



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

EERO VIERTOKOSKI
MURTOVAKOKÄÄMITYKSEN SOVELTAMINEN
HITAISSA KORKEAN HYÖTYSUHTEN
SÄHKÖKONEISSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa 9.
helmikuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

VIERTOKOSKI, EERO: Murtovakokäämityksen soveltaminen hitaissa korkean hyötysuhteen sähkökoneissa

Diplomityö, 73 sivua, 4 liitesivua

Kesäkuu 2011

Pääaine: Teollisuuden sähkökäyttötekniikka

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: Murtovakokäämitys, sähkökone, tuuligeneraattori, staattori, kestopagneetti, hyötysuhde

Maapallon fossiilisten polttoaineiden vähentyessä on kiinnostus uusiutuvia energialähteitä kohtaan lisääntynyt. Uusiutuviin energialähteisiin kuuluu tuulivoima, jonka sähköä tuottavaan komponenttiin, eli generaattoriin, tässä työssä keskitytään. Tuuliturbiinien kehitystrendinä on jo pitkään ollut saada turbiinin kokoa pienemmäksi ja toimintaa yksinkertaisemmaksi. Yleisenä tapana on ollut, että lapojen pyörittämältä akselilta hidas pyörimisnopeus nostetaan generaattoria varten suureksi vaihteiston avulla. Vaihteisto kuitenkin maksaa, vaatii tilaa ja huoltoa. Vaihteiston voi korvata kokonaan hitaasti pyörivällä generaattorilla, joka kytketään suoraan lapojen kanssa samalle akselille.

ABB on kehittänyt kestopagnetoidun 32-napaisen 65 rpm pyörivän tuuligeneraattoriprototyypin (prototyyppi A), jonka nimellisteho on 20 kW. Tässä työssä keskitytään tämän generaattorin hyötysuhteen parantamiseen ja kun ratkaisu on löydetty, rakennetaan siitä uusi prototyyppi (prototyyppi B). Molemmat prototyypit koeajetaan ja niissä käytetään samaa kestopagnetoitua roottoria, jolloin saadaan paras mahdollinen vertailu.

Sähkökoneen simulointityökaluna on käytetty Adept-ohjelmistoa, joka suorittaa sähkökoneelle läpilaskun ja kertoo, miten magneettivuo koneen sisällä käyttäytyy. Lähtökohtana oli prototyypin A staattori, jota muuttamalla päästiin parempaan hyötysuhteeseen. Hyötysuhdetta yritettiin parantaa suunnittelemalla käämityksiä erilaisille ura- ja napaluvuille, muuttamalla staattorin sähköteräslevyn koostumusta, muuttamalla käämityksen kytkentää sarjaankytkennästä rinnankytkentään, ja vielä käämityksen suunnittelua täysin väärälle napaluvulle (esimerkiksi staattoriin 36-napainen käämitys, vaikka roottorissa on 32 napaa). Edellämainituilla toimenpiteillä ei ollut juurikaan merkitystä hyötysuhteeseen. Suurin parannus hyötysuhteeseen saatiin staattorin uran leventämisellä ja korotuksella, jolloin sinne mahtuu enemmän kuparia. Näin ollen virtaa voidaan pienentää magneettivuon pysyessä samana, jolloin staattorin kuparihäviöt vähenevät, koska ne kasvavat verrannollisena virran neliöön. Uran syventämisen haittapuoli on staattoriselän ohentuminen, jolloin siinä kulkeva magneettivuo on vaarassa kyllästyä. Ohutselkäinen staattorirautapaketti on myös vaikea asentaa koneen runkoon, koska puristuksessa se ei pysy kasassa. Ainut vaihtoehto on lämpösovite.

Uran kokoa kasvattamalla saatiin hyötysuhdetta koeajojen perusteella nostettua noin 12 %, mikä on todella paljon kun koneen laakerit, runko ja roottori pysyivät samana. Prototyypin B käämin päiden lämpötila oli myös 48 °C viileämpi kuin prototyypillä A.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Technology

VIERTOKOSKI, EERO: Using fractional slot winding in slow rotating high efficiency electric machines

Master of Science Thesis, 73 pages, 4 Appendix pages

June 2011

Major: Utilization of Electrical energy

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Fractional slot winding, electric machine, wind generator, stator, permanent magnet, efficiency

Meanwhile Earth's fossil fuels are diminishing is an interest towards renewable energy sources increasing. Renewable energy sources include wind power, to whose energy generating component, namely the generator, this work focuses. Development trend of wind turbines has for long been to get the size of the turbine smaller and the operation simpler. Common practice has been that slow rotational speed of the shaft, which blades are rotating, is increased for the generator using a gearbox. However, gearbox adds costs, requires space and maintenance. The gearbox can be entirely replaced by slow rotating generator, which is connected directly with the blades to the same shaft.

ABB has developed a slow rotating permanent magnet wind generator prototype (prototype A), which rotates 65 rpm, has 32 poles and rated power 20 kW. This thesis focuses on improving the efficiency of this generator and when a solution is found, a new prototype (prototype B) is made. Both prototypes are tested using the same permanent magnet rotor, resulting in the best possible comparison.

As simulation tool for electric machine has been used Adept-software, which carries out calculations and shows how the magnetic flux inside the machine behaves. The starting point was the stator of the prototype A, which was improved in order to achieve the better efficiency. The efficiency was tried to improve by designing windings to different slot- and pole numbers, changing the material of the stator electric plate, changing the connection of the winding from serial to parallel, and yet designing of the winding to completely wrong pole number (for example to the stator a winding, which has 36 poles even if the rotor has 32 poles). The above mentioned means had no significant change to efficiency. The largest improvement to efficiency was achieved by widening and deepening the slot when there is more place to copper. Thus, current can be reduced while the magnetic flux remains the same and the stator copper losses are reduced because they will increase proportional to the square of current. The negative side of deepening the slot is that the stator core will be thinner and the magnetic flux in it is in danger to saturate. When the stator core is very thin, it is difficult to install to the machine frame because in pressing it does not maintain its shape. Then the only option is heat fitting.

Increasing the size of the slot the efficiency raised about 12 % according to the test drive. That is very much when bearings, frame and rotor of the machine remained the same. In case of prototype B the temperature of the end of coil was 48 °C cooler than in prototype B.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Vaasassa ABB Oy Motorsin tuotekehitysosastolla. Ohjaajana ABB Oy:n osalta oli tekniikan tohtori Jouni Ikäheimo, jota haluan kiittää erittäin mielenkiintoisesta aiheesta, ohjeista ja neuvoista. Työn tarkastajana toimi Tampereen Teknilliseltä yliopistolta professori Seppo Valkealahti, jota haluan kiittää työn tarkastamisesta ja hyvistä neuvoista työn suhteen.

Haluan kiittää myös koko tuotekehitysosaston henkilökuntaa erittäin viihtyisästä työympäristöstä, rennosta työilmapiiristä, saamistani neuvoista sekä kaikkia muita henkilöitä, jotka ovat auttaneet ja tukeneet minua tämän työn tekemisessä.

Vaasassa 24.6.2011

Eero Viertokoski

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Murtovakokäämitty kestopagneettitahtikone	2
2.1	Kestomagneettimateriaalit	2
2.2	Kestomagneettien sijainti roottorissa	4
2.2.1	Pinta-asennetut magneetit	5
2.2.2	Uppoasennetut magneetit	6
2.3	Kestomagnetoidun tahtikoneen käämitys	7
2.4	Tahtikoneen murtovakokäämitys	9
2.4.1	Murtovakokäämityksen suunnittelu	11
2.4.2	Käämityskertoimet	19
3	Staattorin hyötysuhde	21
3.1	Hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät	23
3.1.1	Hajavuo	23
3.1.2	Staattorikäämityksen resistiiviset häviöt	23
3.1.3	Staattorin rautahäviöt	24
3.1.4	Yliaallot	29
3.2	Poikittaisvuosähkökone	32
4	Murtovakokäämityksen generaattorin prototyypit	36
4.1	Prototyyppien roottori	36
4.2	Prototyypin A staattori	37
4.3	Hyötysuhteen parantaminen	39
4.4	Prototyypin B staattori	41
4.5	Uran mittojen optimointi Adeptin avulla	43
5	Murtovakokäämittyjen prototyyppigeneraattoreiden koeajo	46
5.1	Koeajon järjestelyt	46
5.2	Prototyypin A koeajo	50
5.3	Prototyypin B koeajo	53
6	Tulokset ja niiden tarkastelu	56
7	Yhteenveto	59
	Lähteet	60
	Liite 1: 2-tasomurtovakokäämityksen käämityskertoimet ilman urakerrointa	63
	Liite 2: Adept-laskelma prototyypille A generaattorina	64
	Liite 3: Adept-laskelma prototyypille B generaattorina	65
	Liite 4: Matlab-koodi jännitteen ja virran harmonisten komponenttien laskentaan	66

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a_c	Käämijohtimen poikkileikkauspinta-ala
\hat{A}_{muoto}	Virtakatteen huippuarvo muotokuparille
$\hat{A}_{pyörö}$	Virtakatteen huippuarvo pyörölangalle
b_s	Staattorin uran leveys hampaan kärjestä
B	Magneettivuon tiheys
B_{peak}	Magneettivuon tiheyden huippuarvo
d_i	Eristyksen paksuus
e	Staattorikäämiin indusoituneen jännitteen hetkellisarvo
E_{max}	Indusoituneen jännitteen huippuarvo
E_{rms}	Indusoituneen jännitteen tehollisarvo
f	Taajuus
F_m	Sähkömotorinen voima
h_u	Staattorin uran syvyys
H	Koersitiivikentänvoimakkuus
J_c	Käämin johtimen virrantiheys
k	Lämpötilavakio käämimateriaalille
k_{Cu}	Kuparin täytekerroin
k_e	Häviöverrannollisuuskerroin
I_s	Staattorin vaihevirran tehollisarvo
l	Staattorin aksiaalinen pituus
l_c	Johtimen keskimääräinen pituus (puolet käämikierrroksesta)
m	Vaiheiden lukumäärä
n	Vakoluvun nimittäjä
n_m	Sähkömoottorin kierrosnopeus
n_s	Synkroninen pyörimisnopeus
M	Sähkömoottorin tuottama momentti
N	Käämikierrosten lukumäärä
\mathbb{N}	Normaalilukujen joukko (1, 2, 3, ...)
p	Napaparien lukumäärä
P_e	Staattorin rautahäviöt
P_{ed}	Keskimääräinen staattorin pyörrevirtojen häviötiheys
P_{sc}	Staattorin resistiiviset häviöt
$2p$	Napojen lukumäärä
r	Ilmavälin radiaalinen pituus
R	Staattorin sisähalkaisija
R_1	Käämivyyhdin resistanssi lämpötilassa T_1
R_2	Käämivyyhdin resistanssi koeajon lopussa
R_s	Staattorin resistanssi vaihetta kohti
Q	Staattorin urien määrä

S_{Cu}	Kuparijohtimen pinta-ala
t	Uratähtimenetelmässä muuttujien jakaja
t_1	Aika
T_1	Käämivyyhdin lämpötila ennen koeajon aloitusta
T_2	Käämivyyhdin lämpötila koeajon lopussa
U	Jännite
V	Staattoriraudan tilavuus
V_c	Käämimateriaalin tilavuus
w_u	Staattorin uran leveys
z	Vakoluvun osoittaja
ξ_v	Vyyhtikerroin
ξ_r	Ryhmäkerroin
ξ_u	Urakerroin
$\xi_{käämitys}$	Käämityskerroin
ρ	Johdinmateriaalin resistiivisyys
ρ_i	Staattoriraudan tiheys
λ	Käämivuo
Φ	Magneettivuo
θ	Roottorin kulma
τ_p	Napajako
μ	Yliaallon järjestysluku
ν	Yliaaltojen napapariluku
ω	Kulmanopeus
ABB	Asea Brown Boweri
FFT	Nopea Fourier-muunnos (engl. Fast Fourier Transform)
rpm	Kierrosta minuutissa (engl. Revolutions per minute)

1 JOHDANTO

Nykyään energiateollisuudessa on tavoitteena pyrkiä vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä, koska niiden on ennustettu jonakin päivänä loppuvan tai vähintään vähentyvän dramaattisesti maapallolta. Näiden energiaraaka-aineiden vähentymisen myötä niiden hinta kasvaa, jolloin uusia ratkaisuja on etsitty uusiutuvista energiamuodoista. Uusiutuvien energialähteiden käytöllä yritetään myös vähentää maapallon hiilidioksidipäästöjä ilmastotavoitteiden mukaisesti. Uusiutuvia energialähteitä ovat esimerkiksi aurinko, vesi ja tuuli. Aurinko- ja tuulivoiman tuotto vaihtelee paljon, jolloin vesivoimaa käytetään myös tätä vaihtelua kompensoivana säätövoimana. Tuulivoiman lisärakentaminen on lisääntynyt muutaman viimeisen vuoden aikana todella paljon varsinkin Euroopassa.

Tuulivoimateknologiassa tavoitteena on päästä yksinkertaiseen ja luotettavaan rakenteeseen, jolla hyötysuhde on myös mahdollisimman korkea. Tuuliturbiinissa sijaitsevan vaihteiston tarkoituksena on nostaa hidas pyörimisnopeus suureksi generaattoria varten. Vaihteisto aiheuttaa kuitenkin lisäkustannuksia, häviöitä ja huoltotarvetta, jolloin teoriassa edellä mainittu tekniikka voidaan korvata hitaasti pyörivällä generaattorilla, joka on kytketty pyörivien lapojen kanssa samalle akselille. Tällöin rakenteen kokonaishyötysuhde nousee.

ABB on kehittänyt Motorsin tuotekehitysyksikössä hitaasti pyörivän tuuligeneraattoriprototyypin, jonka pyörimisnopeus on 65 rpm ja nimellisteho 20 kW. Tämän työn tarkoitus on etsiä keinoja, millä tämän tuuligeneraattoriprototyypin hyötysuhdetta saadaan nostettua. Sähkökoneen toimintaa simuloidaan Adept-laskentaohjelmiston avulla, joka kertoo tarkasti sähkökoneen käyttäytymisen eri parametreja muutettaessa. Kun parannusehdotus on löytynyt, valmistetaan siitä uusi prototyyppi. Tarkan vertailun toteuttamiseksi ja toiminnan selvittämiseksi molemmat generaattoriprototyypit koeajetaan käyttäen samaa roottoria. Tässä työssä perehdytään myös siihen, että kuinka suureksi hyötysuhde voidaan nostaa, jolla sähkökone vielä toimii normaalisti. Hyötysuhteella on aina olemassa yläraja, jonka ylityksen jälkeen sähkökoneen toiminta käy epävakaaksi.

Työn alkuosassa perehdytään kestopagnetoitujen tahtikoneiden teoriaan ja murtovakokäämityksien suunnitteluun. Tämän työn pääpaino on hyötysuhteen parantamisessa, joten sähkökoneen hyötysuhteeseen vaikuttavia asioita tarkastellaan ilmiöittäin. Tarkoitus on aina joka ilmiön kohdalla minimoida sen hyötysuhdetta alentava vaikutus. Teoriaosan jälkeen esitellään molemmat prototyypit, niiden ominaisuudet ja toteutetut keinot hyötysuhteen parantamiseen. Tämän jälkeen suoritetaan koeajot ja vertaillaan molempien prototyyppien toimintaa keskenään.

2 MURTOVAKOKÄÄMITTY KESTOMAGNEETTITAHTIKONE

Kestomagneettitahtikone on erittäin yleinen sähkökone teholuokassa milliwateista megawatteihin mitä erilaisimmissa sovelluksissa, kuten sähköhammasharjoissa, tulostimissa, kelloissa, sähköautoissa, satelliiteissa, sähköporakoneissa ja monissa muissa laitteissa. Kestomagneettikoneen käytöstä on tullut kehityksen myötä jopa kiinnostavampi vaihtoehto tavalliseen induktiokoneeseen verrattuna. Kestomagneettikoneen käytön myötä hyötysuhde kasvaa, koska kestomagneetit sijaitsevat roottorissa ja näin magnetointivirran siirtämiseen tarkoitetuista hiiliharjoista ja liukurenkaista päästään kokonaan eroon. Kestomagneettitahtikoneen häviöt tapahtuvat pääasiassa staattorissa, josta ne voidaan helposti siirtää lämpönä jäähdytysprofiiliin kautta ympäröivään ilmaan. (Gieras & Wing 1997, ss. 1-2.)

Kestomagneettitahtikonetta käytettäessä tehon suhde painoon kasvaa, dynaaminen suorituskky paranee ja luotettavuus nousee. Magneettimateriaalien hinnan lasku on myös lisännyt kestomagneettitahtikoneen suosiota. Puolijohdekomponenttien jatkuva kehitys on edesauttanut sitä, että kestomagneettitahtikoneen ohjaamisesta on tullut helpompaa ja tehokkaampaa samaan aikaan sen kanssa, että konetta voidaan ajaa laajalla pyörimisnopeusalueella ilman, että hyötysuhde oleellisesti laskisi. Lisäksi tietyissä käyttösovelluksissa, kuten tuuligeneraattoreissa, kestomagneettitahtikone voidaan kytkeä suoraan turbiinin akseliin ilman vaihteistoa, jolloin kaikki vaihteistoon liittyvät kustannukset ja häviöt poistuvat. (Gieras & Wing 1997, ss. 1-2.)

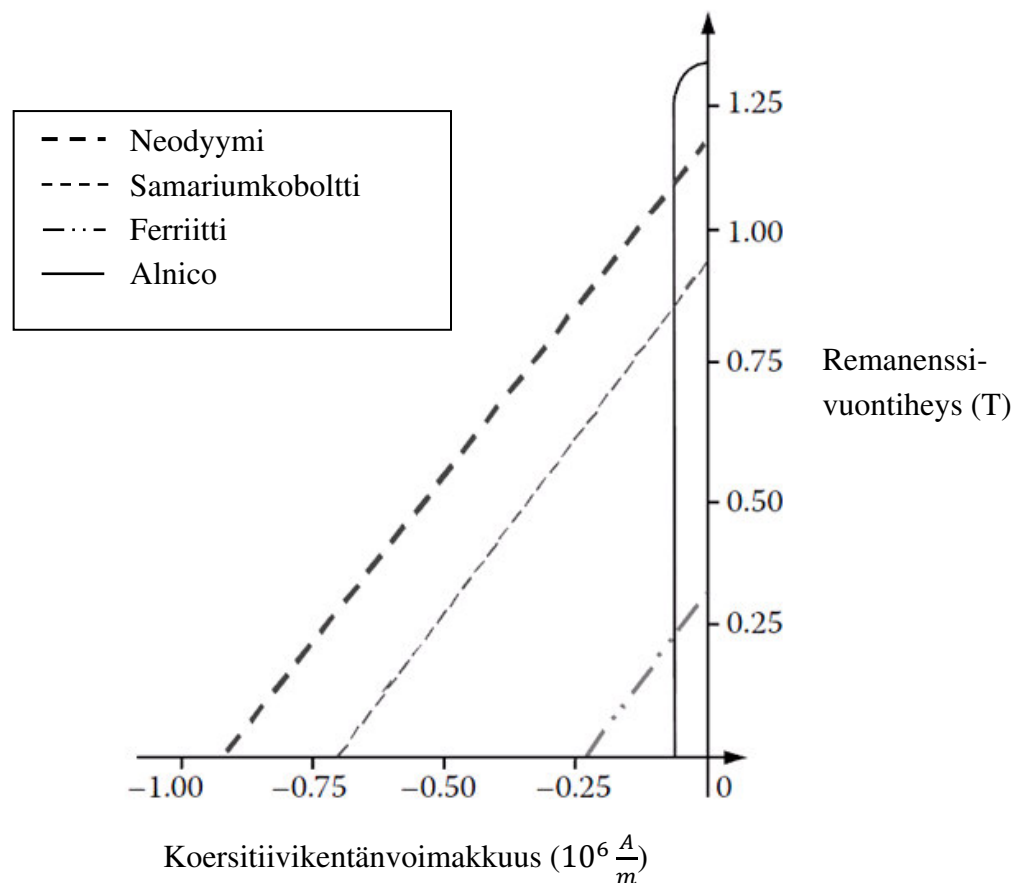
Tahtikoneen nimitys tulee siitä, että koneen roottori pyörii stationääritilassa koneen ilmvälimagneettikentän ja siten myös syöttävän verkon kanssa tarkalleen samalla nopeudella eli tahtinopeudella. Murtovakotahtikoneet, joissa käämitys on aina yhden staattorihampaan ympärillä, mahdollistavat suuremman roottorin valmistamisen verrattuna siihen, että käytettäisiin perinteistä eri uriin jaettua staattorikäämitystä. Kun saman koneen runkoon voidaan tehdä isompi roottori, tuottaa kone myös enemmän vääntömomenttia. (Jussila 2005, s. 12.)

2.1 Kestomagneettimateriaalit

Kestomagneeteiksi soveltuvat niin sanotut kovat materiaalit, joille tyypillisiä piirteitä ovat ulkoisen magnetoinnin jälkeen saavutetut korkeat remanenssivuontiheys ja koersitiivikentänvoimakkuus. Sauvamaiset magneetit magnetoidaan sijoittamalla sauva voimakkaan sähkömagneetin napojen väliin. U-muotoiset magneetit magnetoidaan siten, että navat oikosuljetaan pehmeän raudan avulla, jonka jälkeen syntynyt silmukka

käämitään ja tähän käämijohtimeen johdetaan muutaman tuhannen ampeerin virta. Magneettivuo pienenee hieman kun oikosulkukappale poistetaan. Kun oikosulkukappale laitetaan uudelleen paikoilleen, kasvaa magneettivuo, mutta ei saavuta enää alkuperäistä arvoaan. Muutaman magneetti-piirin avaamisen ja sulkemisen jälkeen toiminta asettuu stationääriseen tasapainotilaan. (Tuusa et al 2004, s. 135.)

AlNiCo-magneetit koostuvat alumiinin, nikkelin, kobolttin ja raudan seoksesta. Sen etuja ovat korkea magneettinen remanenssivuontiheys ja alhainen lämpötilakerroin. Nämä ominaisuudet mahdollistavat korkean ilmävälivuontiheyden ja korkean käyttölämpötilan (kestää jopa 520 °C). Koersitiivikentänvoimakkuus on tosin erittäin alhainen, joka huomataan jo kuvan 2.1 käyrältäkin, jolloin AlNiCo on helppo demagnetisoida. AlNiCo:a on käytetty moottoreissa kokoluokissa parista watista 150 kW:iin asti, mutta vuoden 1970 jälkeen ferriiteistä tuli eniten käytettyjä kestopagneettikoneissa. (Gieras & Wing 1997, ss. 41-46.)



Kuva 2.1. Kestomagneettien remanenssivuon tiheyksiä koersitiivikentän voimakkuuden funktiona. Parhaat magneettiset ominaisuudet ovat neodyymilla (Krishnan 2010, s. 6).

Ensimmäiset kestopagneetit olivat ferriittejä, jotka keksittiin 1950-luvulla. Niillä on korkeampi koersitiivikentänvoimakkuus kuin AlNiCo:lla, mutta samalla alhaisempi remanenssivuontiheys, joka näkyy kuvasta 2.1. Lämpötilakerroin on korkeampi kuin AlNiCo:lla, jolloin se kestää lämpöä maksimissaan noin 400 °C. Ferriittien etuja ovat

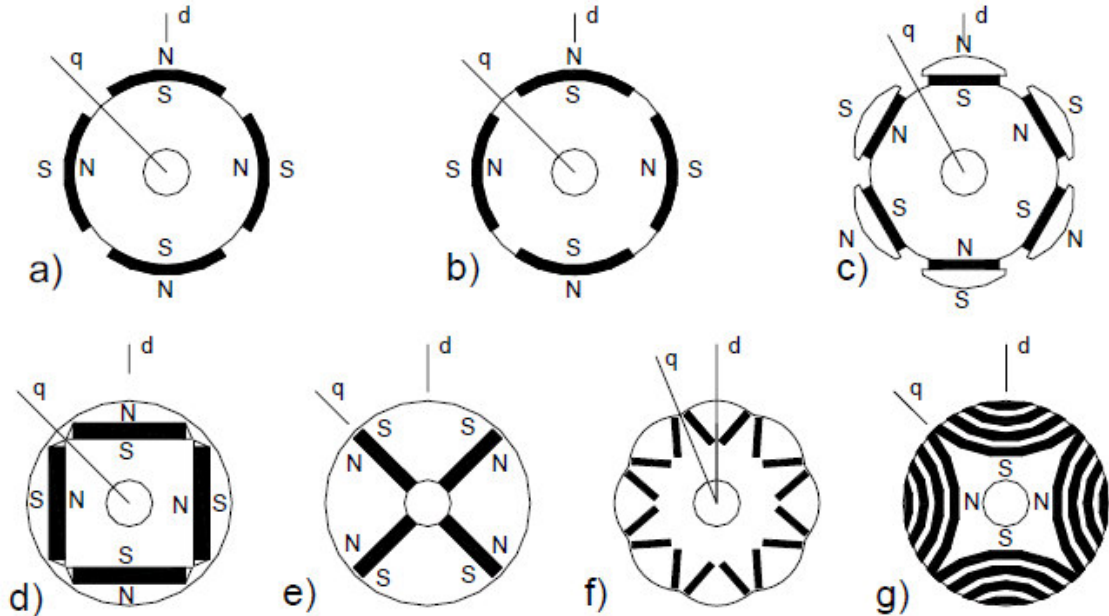
halpa hinta ja korkea sähköinen eristävyys, joka estää tehokkaasti pyörrevirtahäviöitä. Ferriittimagneetit ovat taloudellisimpia pienen tehon sähkökoneissa, kuten esimerkiksi auton pienissä sähkömoottoreissa (puhaltimet, pumput ja pyyhkijät), joissa on käytetty barium-ferriittejä. Strontium-ferriitillä on parempi koersitiivikentänvoimakkuus kuin barium-ferriitillä. (Gieras & Wing 1997, ss. 41-46.)

Harvinaisilla maametallimagneeteilla on magneeteista parhaimmat ominaisuudet. Harvinaiset maametallit eivät itse asiassa ole harvinaisia, sillä niiden luonnolliset mineraalit ovat sekoitettuja yhdisteitä. Kun halutaan tuottaa yhtä tiettyä harvinaista maametallia, täytyy sitä varten jalostaa paljon muita aineita, joita ei ole helposti saatavilla. Tämä rajoittaa siis näiden metallien saatavuutta. Yksi tähän ryhmään kuuluva kova magneettinen materiaali on $SmCo_5$, jota on kaupallisesti tuotettu 1970-luvulta lähtien. Sillä on korkea remanenssivuontiheys, korkea koersitiivikentänvoimakkuus, lineaarinen demagnetointikäyrä sekä alhainen lämpötilakerroin, jolloin se kestää lämpöä maksimissaan 300 °C. $SmCo_5$ on yleinen pienikokoisissa moottoreissa. Sen ainut negatiivinen puoli on kallis hinta. (Gieras & Wing 1997, ss. 41-46.)

Toinen harvinaisiin maometalleihin kuuluva hyvät magneettiset ominaisuudet omaava aine on neodyymi-rauta-boori (NdFeB). Neodyymi on paljon yleisempi ja halvempi materiaali kuin samarium (Sm). NdFeB:tä käytetään jatkuvasti kasvavassa määrin, koska sillä on noin 20 °C lämpötilassa paremmat magneettiset ominaisuudet kuin SmCo:lla. NdFeB:n ominaisuudet ovat voimakkaasti lämpötilasta riippuvaisia, esimerkiksi koersitiivikentänvoimakkuus laskee huomattavasti lämpötilan noustessa. Maksimikäyttölämpötila tälle magneettimateriaalille on noin 150 °C ja se on myös herkkä ruostumaan, mutta tätä ilmiötä voidaan ehkäistä pinnoittamalla magneetit esimerkiksi hartsilla tai erilaisilla metallipinnoitteilla. (Gieras & Wing 1997, ss. 41-46.)

2.2 Kestomagneettien sijainti roottorissa

Kestomagneetit voidaan sijoittaa roottoriin monella eri tavalla, kuten kuvassa 2.2 on esitetty. Hitaasti pyörivissä ja suuren momenttitiheyden tahtigeneraattoreissa käytetään yleensä pintamagneetteja kun taas uppomagneetteja käytetään yleensä nopeasti pyörivissä koneissa. Magneettien erilaisista asennustavoista huolimatta tahtikoneen toimintaperiaate ei muutu mihinkään. (Krishnan 2010, s. 31.)



Kuva 2.2. Kestomagneettien eri sijoitusvaihtoehdot roottorissa. a) pintamagneetit, b) pintaan upotetut magneetit, c) pintamagneetit, joiden pinnalla on napakengät, d) tangentiaalisesti asennetut uppomagneetit, e) radiaalisesti asennetut uppomagneetit, f) V-muotoon asennetut uppomagneetit, g) aksiaalisesti laminoidut magneetit (Heikkilä 2002, s. 9).

Kuvassa 2.2 kohdissa a), b), c) ja g) on esitetty pintamagneetit ja kaikki muut kuvat kuvaavat upotettujen magneettien erilaisia asennustapoja. Seuraavaksi keskitytään vertailemaan pinta- sekä uppomagneettien eroja ja ominaisuuksia.

2.2.1 Pinta-asennetut magneetit

Pinta-asennetut magneetit antavat suuren ilmvälivuontiheyden, koska ne ovat suoraan yhteydessä ilmväliin ilman mitään väliaineita. Pinta-asennetuilla magneeteilla haittapuolena on se, että roottorin pinta ei ole tässä tapauksessa mekaanisesti yhtenäinen eikä myöskään mekaanisesti niin kestävä kuin upotettujen magneettien tapauksessa. Pinta-asennetut magneetit on yleensä liimattu kiinni roottoriin, ja tämän pakettin mekaanista kestävyyttä voidaan parantaa sitomalla magneetit ulkopuolelta roottorin kehän ympäri esimerkiksi hartsiteipillä. Roottorin ulkopuolisella pinnoituksella on myös haittapuolensa, koska huollon yhteydessä roottoria ulos vedettäessä saattaa hartsipinnoitus jostain kohtaa revetä, jolloin roottori on pinnoitettava hartsiteipillä uudestaan. Roottori jäähtyy myös paljon hitaammin kun se päällystetään ulkopuolelta. (Krishnan 2010, s. 34.)

Pinta-asennetut magneetit on yleensä tarkoitettu roottoriin, joka pyörii hitaasti. Erityisen pienillä pintamagneeteilla ja pienellä roottorilla voidaan silti päästä jopa 80000 rpm saakka. Mitään yleistä suurinta pyörimisnopeusrajaa ei pinta-asennetuille magneeteille voida asettaa, koska se riippuu täysin roottorin ja magneettien koosta.

Pintamagneettiasenteisen roottorin pyörimisnopeutta ja kestäkykyä voidaan nostaa sillä, että upotetaan magneetit roottorin pintaan, kuten kuvan 2.2 kohdissa b) ja g) on tehty. Nyt magneeteilla on myös sivutukea, jolloin keskipakoisvoiman vähenemisen vuoksi voidaan pyörimisnopeutta nostaa. Tässä tapauksessa tosin ilmavälivuo pienenee hajavuon kasvaessa, koska magneettivuo pääsee kulkemaan nyt magneetin reunasta rautaan. Jos halutaan sinimuotoisempi ilmavälivuo, voidaan käyttää kohdan c) rakennetta, missä magneettien päälle on asetettu pyöreäksi muotoillut napakengät. (Heikkilä 2002, ss. 10-11.)

2.2.2 Uppoasennetut magneetit

Uppoasennetuilla magneeteilla varustetut roottorit ovat erittäin kestäviä ja siksi soveltuvat hyvin nopeasti pyöriin tahtikoneisiin. Tämän tyyppisen roottorin valmistus on monimutkaisempaa ja sen vuoksi kalliimpaa kuin pinta-asennetuilla roottoreilla. V-muotoon uppoasennetut magneetit antavat pinta-asennettuihin magneetteihin verrattuna suuremman magneettivuokonsentraation, koska V-muotoon asennettuna magneettista materiaalia on roottorissa enemmän sen pinta-alaa kohden. Uppoasennetuille magneeteille on paljon erilaisia asennusvaihtoehtoja ja näistä on esitetty 3 kappaletta kuvassa 2.2 d), e) ja f). Asennustavassa e) tarvitaan paljon magneettista materiaalia, varsinkin suurilla napaluvuilla, jonka vuoksi valmistuskustannukset kasvavat korkeiksi suurten ilmavälivuontiheyksien tapauksissa. Sen takia muut rakennevaihtoehdot ovat parempia taloudellisesta näkökulmasta katseltuna. Ainoastaan ferriitit tulevat kyseeseen tässä tapauksessa edullisuutensa ansiosta, jos tyydytään heikompaan ilmavälivuontiheyteen. (Krishnan 2010, s. 34.)

Uppomagneeteista rakennettu roottori saattaa olla hieman pintamagnetoitua suurempi, jolloin sillä on suurempi hitausmomentti. Tämä vaikuttaa hidastavasti kiihdytys- ja jarrutusnopeuteen. Riippuu täysin sovelluksesta, onko sillä merkitystä. Uppomagneeteista rakennetulla roottorilla on suurempi ilmavälivuontiheys kuin pintamagneeteista rakennetulla, joten uppomagneettiroottori tuottaa enemmän momenttia roottorilavuuteen nähden. Uppomagneetit ovat myös hyvin suojassa lialta sekä riskiltä demagnetoitua, ja ne eivät myöskään vaurioidu, jos roottori joudutaan vetämään koneesta ulos esimerkiksi huollon aikana. (Heikkilä 2002, ss. 11-12.)

Magneetit on helpompi asentaa uppomagneettiasenteisen roottorin koloihin kuin pintaan eikä niiden ulkomuodon suhteen ole niin tarkkoja toleranssivaatimuksia kuin pintamagneeteilla on. Uppomagneettiroottorin ilmavälivuontiheys on myös hyvin sinimuotoinen, jolloin momentin aaltoisuus on erittäin pieni. Tämä ominaisuus korostuu hitaasti pyörivillä moninapaisilla tahtikoneilla, koska yleensä niiden sähkömotorinen voima ei ole sinimuotoista. Uppoasenteisten magneettien haittapuolena voidaan pitää hajavuota, jonka olemassaolo pienentää hieman ilmavälivuon suuruutta. Hajavuo karkaa magneettien sivuista roottorin runkoon, mutta sitä voidaan estää esimerkiksi eristävien materiaalien avulla, joita ovat esimerkiksi alumiini ja ilma. (Heikkilä 2002, ss. 11-12.)

2.3 Kestomagnetoidun tahtikoneen käämitys

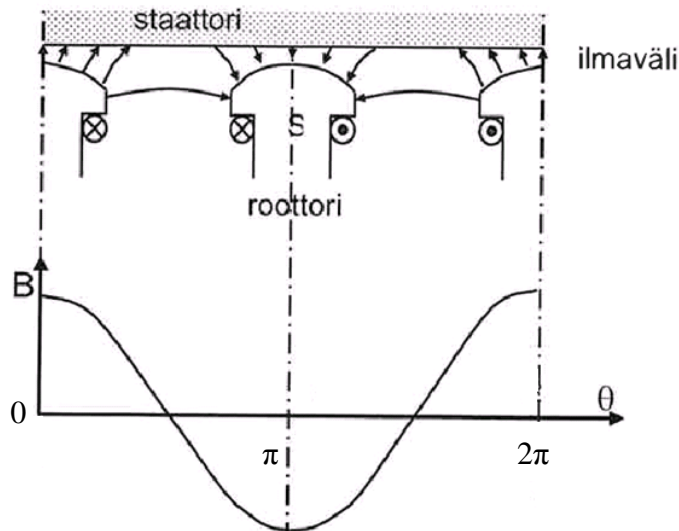
Koska tässä työssä painotus on generaattoreissa, selitetään sähkökoneen pyörimiseen liittyvä teoria ainoastaan generaattorien osalta. Generaattorissa muuttuva magneettikenttä synnyttää staattoriin jännitteen, joka luodaan pyörivässä koneessa siten, että magneettikenttää, eli kestopagnetoitua roottoria, pyöritetään staattorikäämien ohi. Tällöin staattorikäämien kokema magneettivuo muuttuu syklisesti roottorissa olevien kestopagneettien takia, jolloin staattorikäämeihin indusoituu ajasta riippuva jännite, joka siirretään itse koneesta eteenpäin sähköverkkoon. (Nousiainen, Repo 2007, ss. 15-25.)

Tahtikoneen pyörimisnopeus n_s riippuu roottorin napapariluvusta p ja jännitteen taajuudesta f yhtälön

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1)$$

mukaan. Usein tahtikoneessa on enemmän kuin kaksi napaa, koska mitä suurempi napapariluku p on, sitä hitaammin koneen tarvitsee pyöriä. Nelinapaisessa koneessa roottorin pyörähtäessä yhden kierroksen pyörähtää ilmapäivuo kaksi kierrosta. Tahtikoneet ovat lähes aina kolmivaiheisia, kuten tässäkin työssä tutkitut prototyypit. Tällöin kolmivaihekäämit asetellaan staattorin kehälle 120 sähköasteen välein. (Nousiainen, Repo 2007, ss. 15-25.)

Kuvassa 2.3 on esitetty miten roottorin yhden napaparin synnyttämä magneettivuo jakautuu koneen ilmapäivliin staattorin kehälle kun kehä on tasoon levitettyä. Roottorin kestopagneettien synnyttämä ilmapäivlivuo staattorin suhteen on koko ajan vakio, mutta roottorin pyöriessä staattorin käämityksen kokema magneettivuo vaihtelee sinimuotoisesti. Tällöin staattorikäämitykseen indusoituu jännite Faradayn lain mukaisesti. (Nousiainen, Repo 2007, ss. 15-25.)



Kuva 2.3. Kuvan yläosassa on roottorin napakengät ja niiden ympärillä oleva käämitys. Nuolet kuvaavat magneettivuota ja sen kulkusuuntaa. Kuvan alaosassa on magneettivuon tiheysaalto pyörähdyskulman funktiona (Nousiainen, Repo 2007, s. 20).

Roottorin kestopagneetit synnyttävät sinimuotoisen magneettivuon tiheysaallon ilmaväliin staattorin kehälle ja roottori pyörii vakioakselinopeudella ω . Magneettivuon tiheysaallon yhtälö on

$$B = B_{peak} \cos(\theta), \quad (2)$$

missä B on magneettivuon tiheys, B_{peak} on magneettivuon tiheyden huippuarvo ja θ on kulma. Tällöin saadaan ilmavälin magneettivuon arvo napaa kohti yhtälöstä

$$\Phi = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} B_{peak} \cos(\theta) l r d\theta = 2B_{peak} l r, \quad (3)$$

missä l on staattorin aksiaalinen pituus ja r on ilmavälin radiaalinen pituus. (Nousiainen, Repo 2007, ss. 15-25.)

Roottorin pyöriessä staattorin käämityksessä vaikuttava käämivuo muuttuu staattorin ja roottorin magneettiaksien välisen kulman kosinin mukaan. Kun roottori pyörii vakionopeudella, saadaan magneettivuon staattorikäämiin synnyttämä käämivuo yhtälöstä

$$\lambda = N\Phi \cos(\omega t_1), \quad (4)$$

missä N on käämikierrosten lukumäärä, Φ on roottorin ilmaväliin luoma magneettivuo napaa kohden ja t_1 ajanhetki. (Nousiainen, Repo 2007, ss. 15-25.)

Faradayn lain perusteella saadaan staattorikäämiin indusoituneen jännitteen hetkellisarvo yhtälöstä

$$e = \frac{-d\lambda}{dt} = \omega N\Phi \sin(\omega t_1). \quad (5)$$

Yhtälön (5) ensimmäinen termi on nimeltään muuntajajännite, joka voi esiintyä ainoastaan tilanteissa, joissa magneettivuon tiheyden amplitudi muuttuu ajan suhteen. Jälkimmäinen termi syntyy ilmapälvuoaallon ja staattorikäämien välisestä suhteellisesta liikkeestä. Jälkimmäistä termiä on hieman yksinkertaistettu, jolloin se vastaa yleistä termiä sähkömotorisesta voimasta. Yleensä ollaan kiinnostuneita jännitteiden ja virtojen tehollisarvoista, jolloin tahtikonetta tarkastellaan jatkuvuustilassa. Indusoituneen jännitteen huippu- ja tehollisarvot saadaan yhtälöistä

$$E_{max} = \omega N\Phi = 2\pi f N\Phi \quad (6)$$

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N\Phi = 4.44 f N\Phi, \quad (7)$$

missä f on taajuus hertseinä. (Nousiainen, Repo 2007, ss. 15-25.)

2.4 Tahtikoneen murtovakokäämitys

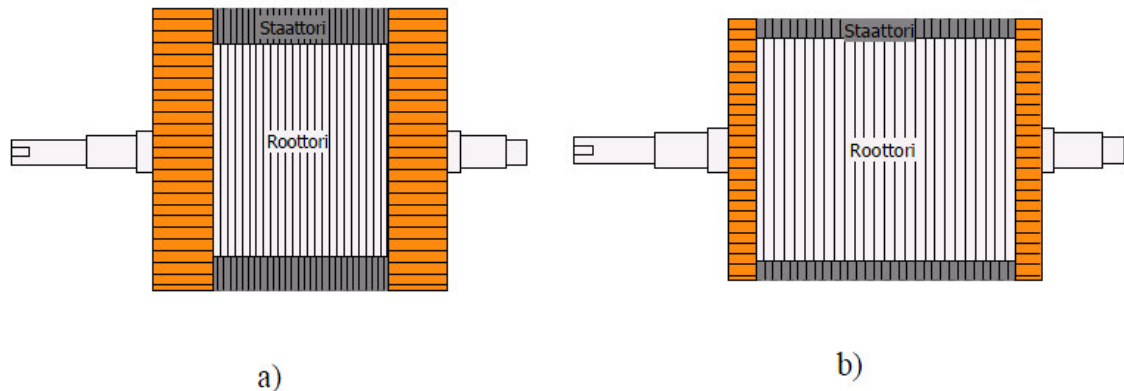
Käämitysten suunnittelussa tärkeää on tietää vakoluku q , joka kertoo montako uraa staattorissa on napaa ja vaihetta kohden. Vakoluku saadaan yhtälöstä

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{z}{n}, \quad (8)$$

missä Q on staattorin urien määrä, $2p$ on napojen lukumäärä, m on vaiheiden lukumäärä, z on vakoluvun osoittaja ja n on vakoluvun nimittäjä. z ja n on oltava kokonaislukuja ja ne eivät saa supistua keskenään. Kokovakokäämityillä sähkökoneilla vakoluku on aina kokonaisluku, mutta murtovakokäämityillä sähkökoneilla se on murtoluku. Yleensä murtovakokäämityksellä vakoluku on ollut ykköstä suurempi, mutta nykyisin trendinä on suunnitella sähkökoneita, joiden vakoluku on ykköstä pienempi (Jussila 2005, s. 12). Tässä työssä keskitytään ainoastaan käämityksiin, joiden vakoluku on ykköstä pienempi, jolloin käämivyyhti on vain yhden staattorihampaan ympärillä. Tällöin vyyhdenpää on mahdollisimman lyhyt ja käämitykseen kuluu mahdollisimman vähän kuparia.

Moninapaisissa murtovakokäämityissä sähkökoneissa on mahdollista ohentaa staattoriselkää, jolloin staattorin uriin mahtuu enemmän kuparia. Tätä muutosta havainnollistaa kuva 2.4, jossa on esitetty kokovakokäämityn ja murtovakokäämityn sähkökoneen ulkoisten mittojen eroavaisuuksia. Ilmapälin kasvaessa momentti kasvaa. Käämityksien vyyhtien päistä voidaan murtovakokoneilla tehdä myös lyhyempiä, jolloin kuparihäviöt ja käämin resistanssi pienenevät. Momentin kasvaessa ja

sähkökoneen ulkomittojen pienentyessä voidaan momentti-tilavuus-suhde saada suureksi. (Salminen 2004, s. 24.)

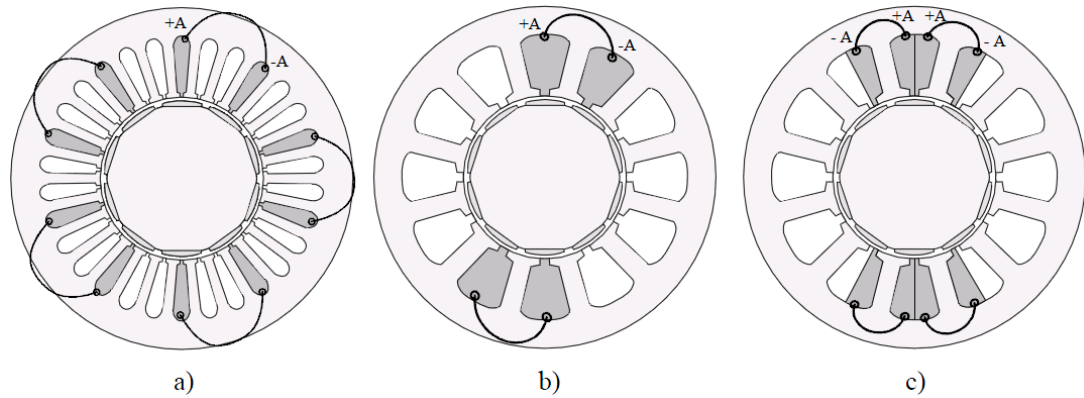


Kuva 2.4. Eri käämistapojen vaikutus sähkökoneen kokoon. a) kokovakokäämitys, b) murtovakokäämitys (Jussila 2005, s.14).

Murtovakokäämityksen rakenne riippuu paljon siitä, minkälaiseen käyttöön kone tulee, paljonko on tilaa käytettävissä, mikä on haluttu pyörimisnopeus ja paljonko napoja tarvitaan. Kokovakokäämityksillä vakoluku vaihtelee yleensä välillä 2-6 ja se valitaan yleensä pääasiassa mekaanisten rajoitusten perusteella. Murtovakokäämityllä koneella vakoluku voidaan valita paljon vapaammin ja tällöin voidaan esimerkiksi hyödyntää jo olemassa olevaa staattorin runkoa ja käämiä se halutulla tavalla. (Salminen 2004, s. 24.)

Murtovakokäämittyjen kestomagneettitahtikoneiden roottorihäviöt kasvavat taajuuden kasvaessa. Tämän vuoksi konetyyppi soveltuu parhaiten alhaisen pyörimisnopeuden sovelluksiin, joissa vaaditaan suurta vääntömomenttia. Murtovakokäämityt kestomagneettitahtikoneet soveltuvat hyvin vaihteettomiin käyttöihin, kuten esimerkiksi auton eri sovelluksiin, tuulimyllyihin, hisseihin, kuljettimiin sekä laivojen potkurikäyttöihin. (Jussila 2005, s. 14.)

Kuvassa 2.5 on esitetty murtovakokäämityn ja kokovakokäämityn koneen ero staattorissa sijaitsevien johtimien osalta. Kokovakokäämityksellä vakoluku q on kokonaisluku ja murtovakokäämityksellä murtoluku. Kokovakokäämityn sähkökoneen vyyhdenpääät ovat selvästi pidemmät kuin murtovakokäämityn sähkökoneen, ero on kaikkein suurin kun käytetään 2-tasomurtovakokäämistä. 1-tasomurtovakokäämityksessä yhdessä urassa on vain yksi vyyhti, mutta 2-tasomurtovakokäämityksessä urassa on 2 eri vyyhtiä ja niiden välissä eristemateriaali. Yleisenä sääntönä voidaan sanoa, että murtovakokäämityn sähkökoneen vyyhdenpään pituus on keskimäärin vain noin 30 % kokovakokäämityn koneen vyyhdenpäästä. Kun vyyhdenpää lyhenee ja käämintään tarvitaan siten vähemmän kuparia, pienenevät staattorin kuparihäviöt ja resistanssi.



Kuva 2.5. Kokovakokäämityksen ja murtovakokäämityksen erot staattorin käämityksessä. a) kokovakokäämitys, b) 1-tasomurtovakokäämitys ja c) 2-tasomurtovakokäämitys (Salminen 2004, s. 26).

Murtovakokäämityn sähkökoneen heikkous on laaja yliaaltojen kirjo, koska sillä esiintyy myös paljon aliharmonisia yliaaltoja, jotka eivät ole yleisiä kokovakokäämityllä sähkökoneella. Näiden ominaisuuksien johdosta ainut sopiva moottorityyppi murtovakokäämitylle sähkökoneelle on kestopagnetoitu tahtikone, jonka roottorin kestopagneettien johtavuus pitäisi olla mahdollisimman pieni. (Salminen 2004, s. 16.)

Murtovakokäämityn staattorin valmistuskustannukset koostuvat pääasiassa kääminnystä, kytkennästä ja eristyksestä. Käämitys ja eristys tulevat murtovakokoneella kokovakokoneetta halvemmaksi, koska esimerkiksi käämitykset voidaan valmistaa koneen ulkopuolella etukäteen ja sitten painaa paikoilleen staattorin hampaan ympärille. Eristyksiä tarvitaan myös vähemmän kokovakokoneeseen nähden. Vyyhdenpäitä ei tarvitse 1-tasomurtovakokäämityksellä eristää ollenkaan, koska ne eivät voi missään vaiheessa edes koskettaa toisiinsa.

2.4.1 Murtovakokäämityksen suunnittelu

Murtovakokäämitys voidaan suunnitella kahdella eri tavalla, jotka ovat uratähtimenetelmä ja taulukkommenetelmä. Uratähtimenetelmä soveltuu paremmin 1-tasokäämien suunnitteluun ja taulukkommenetelmä 2-tasokäämien suunnitteluun. Uratähden avulla on myös mahdollista suunnitella käämityksiä, jotka ovat kahdessa tasossa, mutta taulukkommenetelmän avulla se on helpompaa ja nopeampaa. Taulukkommenetelmän etuna on vielä se, että esimerkiksi Excel-ohjelman avulla voidaan aina käyttää samaa taulukkopohjaa käämityksille, joille uraluku pysyy vakiona ja ainoastaan napaluku vaihtuu. Tämä on huomattavasti nopeampaa verrattuna siihen, että aina täytyisi piirtää uusi uratähti ja sijoittaa johtimet uriin uudestaan.

Murtovakokäämityn sähkökoneen suunnittelun alkuvaiheessa pitää huomioida, että staattorin uraluvun tulisi olla lähellä roottorin napalukua, jolloin staattorin käämityskerroin on mahdollisimman suuri. Tällöin pätee yhtälön (9) mukaan

$$Q \approx 2p,$$




(9)

missä Q on staattorin urien lukumäärä ja $2p$ roottorin napaluku. Nämä luvut eivät saa kuitenkaan olla yhtä suuret, koska tällöin syntyy sähkökoneen sisällä säteen suuntaisia, epäsymmetrisiä magneettisia vetovoimia, joiden summa ei ole nolla. Ne pyrkivät taivuttamaan sähkökoneen akselia ja synnyttävät melua (Salminen, s 35-36). Staattorin uraluvun tulisi symmetrisyyden vuoksi olla aina kolmella jaollinen.

Uratähden avulla suunniteltavaan käämitykseen tarvitaan muutamia perustietoja ja uusia muuttujia, jotka on lueteltu taulukossa 2.1. Kun aluksi on päätetty staattorin uraluku ja napapariluku, saadaan niistä laskettua vakoluku yhtälön (8) avulla. Vakoluvun nimittäjän n mukaan voidaan nyt edetä taulukon ohjeiden mukaisesti seuraavassa järjestyksessä:

- Jos $\frac{n}{2}$ ei kuulu kokonaislukujen joukkoon \mathbb{N} , on kyseessä 1-tasokäämitys, muutoin 2-tasokäämitys.
- Muuttuja t voidaan laskea napaluvun, vakoluvun nimittäjän ja käämitystyyppin perusteella.
- Seuraavaksi on tarkistettava käämityksen symmetriavaatimukset ja jos ne eivät täyty, pitää ura- tai napalukua muuttaa ja aloittaa alusta.
- Muuttujan t avulla saadaan nyt laskettua uratähden piirtämiseen tarvittavia tietoja. Vyyhdenleveys W on aina kokonaisluku ja yleensä se pyöristetään seuraavaan kokonaislukuun alaspäin, $\text{floor}(mq)$, jolloin kääminpäiden pituus on lyhyempi. Luku voidaan myös pyöristää ylöspäin seuraavaan kokonaislukuun, $\text{ceil}(mq)$, jolloin jännekerroin pysyy mahdollisimman suurena. Napakäämityillä murtovakokoneilla tämä luku pitää aina pyöristää arvoon 1. (Perho 2006, ss. 16-18; Pyrhönen 1995, ss. 56-62.)

Taulukko 2.1. Käämityksen suunnitteluun uratähden avulla tarvittavia perustietoja ja vaatimuksia. (Pyrhönen 1995, s. 58-62)

1.	Vakoluvun jakaja	$n/2 \notin \mathbf{N}$	$n/2 \in \mathbf{N}$
			
2.	Käämityksen tyyppi	1-tasokäämitys	2-tasokäämitys
3.	Jakaja t	p/n	$2p/n$
4.	Symmetrisyyden vaatimukset	1. ehto: $2p/n \in \mathbf{N}$ 2. ehto: $n/3 \notin \mathbf{N}$	
5.	Jos symmetriavaatimukset eivät täyty, muuta uralukua tai napaparilukua		
6.	Peruskäämityksen uraluku Q'	Q/t	
	Peruskäämityksen napapariluku p'	p/t	
	Osoitinkulma α_z	360° / Q'	
	Urakulma α_n	(360° x p') / Q'	
	Vyyhdenleveys W	3q (3-vaihejärjestelmälle)	
7.	Osoittimien määrä vaihetta kohti uratähdessä	K=Q'/m	

Termi K kuvaa uratähdessä osoittimien määrää vaihetta kohti. Jos K on parillinen, saadaan yhtä monta positiivista ja negatiivista osoitinta jokaiselle vaiheelle. Jos taas K on pariton, jaetaan osoittimet uriin taulukon 2.2 tavalla.

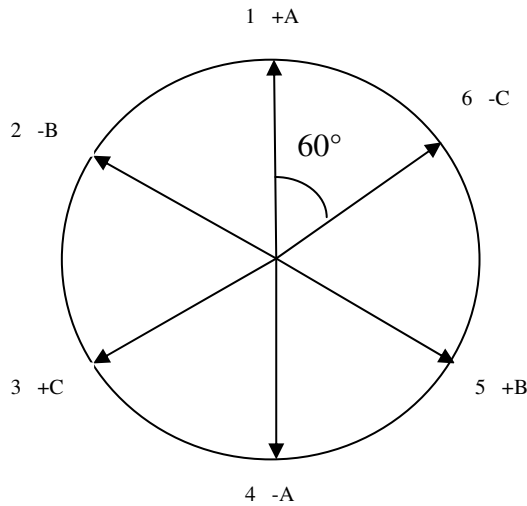
Taulukko 2.2. Ohje vaiheiden jakamisesta staattorin uriin jos uratähdessä osoittimien määrä vaihetta kohti on pariton luku. (Pyrhönen 1995, s. 65 – 66)

Vaihe	+a	-c	+b	-a	+c	-b
Osoittimia	$\text{ceil}(K/2)$	$\text{floor}(K/2)$	$\text{ceil}(K/2)$	$\text{floor}(K/2)$	$\text{ceil}(K/2)$	$\text{floor}(K/2)$

Kun kaikki tarvittavat parametrit on laskettu taulukon 2.1 ohjeiden mukaan ja käämitys täyttää symmetriavaatimukset, voidaan aloittaa johtimien jakaminen staattorin uriin uratähden avulla. Uratähteen piirretään osoittimia, joiden lukumäärän määrää termi Q' ja osoittimien etäisyyden toisistaan määrää osoitinkulma α_z , joka tässä tapauksessa on 60° . Kuvassa 2.6 on esimerkki uratähdessä, jonka johtimien eli osoittimien numerointi on aloitettu yläosasta arvosta 1. Uratähteä lähdetään kulkemaan ylhäältä myötäpäivään ja numero 2 tulee urakulman α_n etäisyydelle urasta 1 eli tässä tapauksessa 300° päähän numerosta 1. Seuraava johtimen numero tulee taas urasta 2 urakulman α_n määräämän etäisyyden päähän.

Tässä esimerkissä termi K eli osoittimien määrä vaihetta kohti on parillinen, joten positiivisia ja negatiivisia johtimia tulee sama määrä vaihetta kohti. Jos K olisi pariton, jaettaisiin johtimet uratähden kehälle taulukon 2.2 mukaisesti. Johtimet jaetaan

uratähden kehälle urasta 1 lähtien myötäpäivään järjestyksessä +A, -C, +B, -A, +C, -B ja jos uria on enemmän kuin kuusi kappaletta, toistetaan tätä vaihejärjestystä niin kauan kunnes saadaan jokaiselle urasoittimelle vaihe merkittyä.



Kuva 2.6. Esimerkki uratähdestä, jossa osoitinkulma on 60° ja urakulma 300° .

Taulukossa 2.3 on esitetty, miten johtimet tulee jakaa uriin uratähden avulla. Kuvan 2.6 tapauksessa vaiheiden merkitseminen aloitetaan urasta 1, johon tulee A+ -johdin, seuraavaan uraan 2 tulee -B -johdin ja tätä samaa tapaa jatketaan niin kauan, kunnes on päästy viimeiseen uraan asti. Näin on luotu ensimmäisen tason murtovakokäämitys, jonka vaihejärjestys on merkitty taulukkoon kohdalle, joka vastaa vyyhdenleveyttä 3. Jos kuvan 2.6 uratähdestä tehtäisiin 2-tasomurtovakokäämitys, jaettaisiin johtimet uriin taulukossa 2.3 olevan vyyhdenleveyttä $W = 3$ vastaavan ohjeen mukaisesti. Vyyhdenleveys tarkoittaa siis sitä, kuinka monen uran päähän saman vaiheen plusjohdin tulee miinusjohtimesta. Jos kyseessä on toisen tason murtovakokäämitys, tulevat vaiheiden plus- ja miinusjohtimet eri korkeustasoille, jolloin yläkerroksessa olevan johtimen etumerkki määrää suoraan alakerroksessa olevan saman vaiheen etumerkin. Yläkerros on aina lähinnä staattorin ja roottorin välistä ilmaväliä ja alakerros käämitään aina staattorin uran pohjalle, yläkerroksen alle.

Murtovakokäämityksellä vyyhdenleveys 1 on yleinen, koska sillä vyyhdenpää on mahdollisimman lyhyt ja käämitys helpompaa, koska tällöin voidaan käyttää valmiita käämejä. Lisäksi jos vyyhdenleveys on 1, ei vyyhdenpäitä tarvitse eristää toisistaan, mutta mitä suurempi vyyhdenleveys on, sitä enemmän vyyhdenpäitä tulee eristää toisistaan.

Taulukko 2.3. Ohje johtimien jakamisesta uriin käämitystyyppin ja vyyhdenleveyden mukaan kun kyseessä on murtovakokäämitys.

Käämitystyyppi	Vyyhdenleveys W	Johtimet urissa											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-taso	1	+A	-A	-C	+C	+B	-B	-A	+A	+C	-C	-B	+B
1-taso	2	+A	-C	-A	+C	+B	-A	-B	+A	+C	-B	-C	+B
1-taso	3	+A	-C	+B	-A	+C	-B	-A	+C	-B	+A	-C	+B
2-taso	1	+A	-C	+B	-A	+C	-B	+A	-C	-B	-A	+C	-B
		+B	-A	+C	-B	+A	-C	+B	-A	+C	+B	+A	-C
2-taso	2	+A	-C	+B	-A	+C	-B	+A	-C	+B	-A	+C	-B
		-C	+B	-A	+C	-B	+A	-C	+B	-A	+C	-B	+A
2-taso	3	+A	-C	+B	-A	+C	-B	-A	+C	-B	+A	-C	+B
		+A	-C	+B	-A	+C	-B	-A	+C	-B	+A	-C	+B

2-tasomurtovakokäämitys voidaan myös suunnitella taulukon avulla, jolloin se on helpompaa ja nopeampaa urätähteen verrattuna. Taulukossa 2.4 on esimerkki murtovakokäämityksen suunnittelusta kun lähtötietoina ovat vain ura- ja napapariluku, jotka ovat $Q=18$ ja $2p=16$. Taulukko koostuu kolmesta osasta, joista ylimpänä on uran alimman kerroksen suunnittelu, keskellä uran ylimmän kerroksen suunnittelu ja alimpana näistä kahdesta taulukosta saatu lopullinen 2-tasomurtovakokäämitys. Käämityksen suunnittelu aloitetaan alimman kerroksen taulukon laatimisesta:

- Ensin lasketaan ura- ja napaluvun avulla vakoluku, jonka osoittajaa z ja nimittäjää n tarvitaan määrittämään taulukon pysty- ja vaakakoko, vyöhykkeiden määrä vaihetta kohti sekä vaiheiden sijoitusjärjestys toisistaan. Esimerkkinä tässä käytetään yllämainittuja ura- ja napalukua, joille vakoluvun arvoksi tulee $q = \frac{3}{8}$.
- Ala- ja yläkerroksien taulukon kokonaisruutumäärä saadaan laskettua termillä nQ .
- Yhteen vaakariviin tulee $2\tau_p$ verran ruutuja eli yhteensä $\frac{nQ}{p} = 6z$ kappaletta.
- Vaiheet jaetaan kuuteen eri vyöhykkeeseen, joista kaksi vyöhykettä on samalle vaiheelle, toinen on positiivinen ja toinen negatiivinen. Yhden vyöhykkeen leveys on suoraan vakoluvun osoittajan z määräämä määrä ruutuja.
- Vyöhykkeet merkitään alakerroksen taulukkoon järjestyksessä +A, -C, +B, -A, +C, -B.
- Taulukon täyttäminen aloitetaan numerolla 1, joka laitetaan ensimmäiseen ruutuun vasempaan yläkulmaan.
- Seuraavaa uraa tarkoittava numero 2 sijoitetaan ensimmäisestä ruudusta oikealle vakoluvun osoittajan n määräämän ruudun päähän. Seuraavat numerot sijoitetaan aina n ruudun päähän toisistaan ja taulukon täyttämistä jatketaan niin kauan, kunnes kaikki uranumerot on käytetty. Tässä

esimerkissä taulukkoon tulee siis 18 numeroa. Yleensä jo kuuden numeron jälkeen nähdään taulukossa yhtäläisyyksiä numeroiden sijainnissa, jolloin loput numerot voidaan sijoittaa taulukkoon ottaen mallia edellisten numeroiden sijainnista. Tässä esimerkissä numerot kasvavat vasemmalle alaviistoon ja kun tämän jaksollisuuden huomaa, voi taulukon täyttää nopeasti.

- Seuraavaksi siirrytään käämityksen yläkerroksen taulukon täyttämiseen. Yläkerroksen taulukossa kaikki vaiheet ovat erimerkkisiä kuin alakerroksen taulukossa, mutta esimerkin mukaisesti saman vyöhykkeen vaiheet pysyvät aina samana. Muilta osin taulukon fyysinen rakenne pysyy samana kuin alakerroksen taulukossa. Yläkerroksen taulukon numerointi aloitetaan myös ensimmäisestä ruudusta vyöhykkeenleveyden W verran suurempana verrattuna alakerroksen taulukon ensimmäiseen numeroon. Napakäämityillä murtovakokoneilla vyöhykkeenleveys on aina 1, joten myös tässä esimerkissä yläkerroksen numerointi aloitetaan numerosta 2. Taulukko täytetään taas niin, että kaikki uraluvut tulevat käytettyä. Taulukon arvot tulevat samoihin kohtiin kuin alakerroksen taulukossa, joten taulukon täyttö käy nopeasti kun kasvatetaan arvoa vain vyöhykkeenleveydellä ja sijoitetaan arvot uuteen taulukkoon.
- Seuraavaksi voidaan koota lopullinen käämitys alimpaan taulukkoon ala- ja yläkerroksen taulukoiden perusteella. Yläkerros merkitään ylemmälle riville, koska se on lähempänä ilmaväliä. Taulukko täytetään poimimalla kerrosta vastaavasta taulukosta numeroa vastaava vaihe ja sen etumerkki. Taulukkoa täytettäessä suunnittelua nopeuttaa se, että täytetään vain yläkerroksen rivi ja sen perusteella täytetään alakerroksen rivi. Tämän jälkeen voidaan tarkistaa alakerroksesta muutama numero ja katsoa, että vaiheet vastaavat molemmissa taulukoissa toisiaan. Periaatteena on aina se, että vyöhykkeen toinen sivu tulee yläkerrokseen ja toinen seuraavan uran alakerrokseen. Näin on luotu symmetrinen 2-tasomurtovakokäämitys. (Jussila 2005, ss. 24-25.)

Taulukko 2.4. Esimerkki murtovakokäämityksen suunnittelusta taulukkomenetelmällä. Yläosassa on taulukko käämityksen alakerrokselle, keskellä yläkerrokselle ja alimpana valmis käämitys. Käämitykselle $Q=18$, $2p=16$, $q = 3/8$.

ALAKERROS

	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B
1	1							2									3	
2							4							5				
3					6								7					
4			8								9							
5	10								11									12
6							13								14			
7					15								16					
8			17								18							

YLÄKERROS

	-A	-A	-A	+C	+C	+C	-B	-B	-B	+A	+A	+A	-C	-C	-C	+B	+B	+B
1	2								3								4	
2							5								6			
3					7								8					
4			9							10								
5	11								12								13	
6							14								15			
7					16								17					
8			18								1							

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
YLÄKERROS	+A	-A	-B	+B	-B	-C	+C	-C	-A	+A	-A	-B	+B	-B	-C	+C	-C	-A
ALAKERROS	+A	+B	-B	+B	+C	-C	+C	+A	-A	+A	+B	-B	+B	+C	-C	+C	+A	-A

Yleensä sähkökonetta suunniteltaessa on runkokoko etukäteen tiedossa ja siihen pitäisi suunnitella yhteenpantavista rautalevyistä sopiva staattoripaketti. Tällöin suureen rooliin tulee staattorin urien muoto, koska sillä voidaan vaikuttaa koneen sähköisiin ominaisuuksiin. Staattorin geometriaa muuttamalla pyritään määräämään virtakatteen ja virrantiheyden suuruutta, joihin vaikuttavat uriin mahtuvien kuparijohtimien määrä. Virtakatteen huippuarvolle muotokuparia käytettäessä on olemassa yhtälö

$$\hat{A}_{muoto} = \sqrt{2}J_c k_{Cu} \frac{S_{Cu}}{\tau_p} = \sqrt{2}J_c k_{Cu} m \frac{(h_u w_u - 2w_u d_i - 2h_u d_i - 4d_i^2)}{\tau_p}, \quad (10)$$

jossa J_c on virrantiheys johtimessa, k_{Cu} on kuparin täytekerroin, S_{Cu} on kuparijohtimen pinta-ala, h_u on uran syvyys, w_u on uran leveys, d_i on eristyksen paksuus, m on vaiheluku ja τ_p on napajako. Laskennan helpottamiseksi uran muoto on yksinkertaistettu suorakaiteen muotoiseksi. Pinta-alalauseketta muuttamalla voidaan edellisestä yhtälöstä saada lauseke pyöreälle langalle, jolloin virtakatteen huippuarvo pyörölangalle määräytyy yhtälöstä

$$\hat{A}_{pyörö} = \sqrt{2} J_c k_{cu} m \frac{w_u h_u}{\tau_p}, \quad (11)$$

jossa w_u on uran leveys ja h_u uran syvyys. Jos virrantiheys ja virtakate on valittu liian suureksi, ylittyy koneessa suurin sallittu lämpenemä ja tällöin koneen suunnittelu on aloitettava uudestaan. Virrantiheydelle ja virtakatteelle voidaan määrätä kokemuseräisesti arvot, jotka ovat vain yleispäteviä riippuen erilaisista sovelluksista. Avonapaisille tahtikoneille voidaan virtakatteelle määrittää arvot $30-65 \frac{kA}{m}$ ja virrantiheydelle $3-6,5 \frac{A}{mm^2}$. Jos käytetään suljettua roottorirakennetta ja epäsuoraa jäähdystystä, ovat arvot virtakatteelle $30-80 \frac{kA}{m}$ ja virrantiheydelle $3-5 \frac{A}{mm^2}$. Toteutettavan sähkökoneen toiminta olisi hyvä simuloida ennen sen rakennusta, koska tällöin voidaan määrittää tarkat ja toimivat arvot virtakatteelle sekä virrantiheydelle. (Rilla 2006, s. 15-19.)

Hitaasti pyörivissä kestopagneettikoneissa, joissa pyritään suuriin vääntötiheyksiin, urasyvytydet kasvavat yleensä suuriksi. Uran syvyyttä kasvattamalla voidaan virtakatetta helposti lisätä, mutta tällöin kuparipinta-alan kasvaessa myös koneen kuparihäviöt kasvavat jos virrantiheys pidetään vakiona. Rinnankytketyillä johtimilla on mahdollista lisätä kuparimäärää ja pienentää resistanssia, mutta tällöin on myös nostettava virran suuruutta, koska muuten virrantiheys putoaa eikä kuparin lisäyksestä ole hyötyä jos ajatellaan virtakatteiden kasvattamista. Urasyvyyttä ei myöskään kannata kasvattaa rajattomasti, sillä se johtaa jäähdystysongelmiin, koska lämpö ei pääse johtumaan koneesta pois liian ohuen staattoriselän kautta vaan jää tällöin käämityksiin ja staattorihampaisiin. (Rilla 2006, s. 15-19.)

Syvän uran johdosta liian ohut staattoriselkä johtaa myös muihin ongelmiin, jotka ilmenevät esimerkiksi kokoonpanovaiheessa ja koneen toiminnassa. Jos staattoriselkä on liian ohut, on sitä vaikea käsitellä kun levyjä nidotaan yhteen, koska runko ei tällöin ole enää riittävän jämäkkä. Toinen, suurempi ongelma, ilmenee kun staattorilevypaketti puristetaan hydraulisesti koneen varsinaisen rungon sisään. Liian ohut ja vetelä staattorilevypaketti ei pysy enää kasassa puristusvaiheessa. Pienetkin muodonmuutokset vaikuttavat koneen sähköisiin ominaisuuksiin, tällöin koneen toiminta voi olla epästabiilia jos staattorilevypaketti ei ole enää alkuperäisessä muodossaan. Koneen toimiessa liian ohuella staattoriselällä on myös se riski, että magneettivuo hyppää staattoriselästä runkoon, jolloin koko koneen ulkokuoresta tulee magneettinen. Rungossa kulkeva magneettivuo aiheuttaa myös lämpöhäviöitä. Ohut staattoriselkä myös mahdollistaa raudan kyllästymisen, koska magneettivuon kulkemiseen tarvittava pinta-ala on liian pieni.

Virtakatetta voidaan nostaa myös uran leveyttä lisäämällä jos uran korkeus ja virrantiheys pidetään vakiona. Samalla myös hampaan leveys pienenee, joka johtaa magneettiseen kyllästymiseen ja koneen lämmönsiirron heikentymiseen. Yksi keino

nostaa virtakatetta on myös virrantiheyden kasvattaminen, mutta sekin johtaa tietyn rajan jälkeen lämmönsiirto-ongelmiin ja tehohäviöihin. (Rilla 2006, s. 15-19.)

Uran tulisi kuitenkin olla mahdollisimman leveä ja korkea sekä virrantiheyden mahdollisimman suuri, että saataisiin suurin mahdollinen virtakate, mutta se on aina kompromissi muiden ominaisuuksien ja koneen toimivuuden kustannuksella. Kuparin lisäykseen pätevät samat periaatteet kuin uran korkeuden kasvattamiseenkin.

2.4.2 Käämityskertoimet

Sähkökoneen käämityskerroin on verrannollinen synnytettyyn sähkömagneettiseen momenttiin, joten käämityskerroimen tulisi olla aina mahdollisimman suuri. Sähkökoneessa, missä on alhainen käämityskerroin, alhainen momentti pitää kompensoida joko virran suuruutta tai käämituksen kierroslukua nostamalla. Tällainen ratkaisu ei ole kovin järkevää, joten jo suunnitteluvaihteissa kannattaa valita sellainen ura- ja napalukuyhdistelmä, jolla on korkea käämityskerroin.

Käämityskerroin koostuu kolmesta kertoimesta, jotka ovat vyyhtikerroin, ryhmäkerroin ja urakerroin. Vyyhtikerroin ilmoittaa vyyhden läpi menevän tehollisen magneettivuon suhteellisen pienenemisen kun vyyhdenleveys eroaa napajaosta (Tuusa et al 2004, s. 57). Vyyhtikerroin määritellään

$$\xi_v = \sin\left(\frac{v\pi}{Q}\right), v = p + \frac{6pg}{n}, g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (12)$$

missä v on napapariiluku yliaaltoja varten eli perusaallolle $v = 2$. Ryhmäkerroin kertoo, kuinka paljon käämin aiheuttama sähkömotorinen voima pienenee kun se jaetaan q vyyhtiin ja sijoitetaan peräkkäisiin uriin (Tuusa et al 2004, s. 54). Ryhmäkerroin määritellään

$$\xi_r = \frac{\sin\left[\left(\frac{\pi}{2} - \frac{v\pi}{Q}\right)z\right]}{z \sin\left[\left(\frac{\pi}{2} - \frac{v\pi}{Q}\right)\right]}, \quad (13)$$

missä z on uraluvun osoittaja. Urakerroin puolestaan määritellään

$$\xi_u = \frac{\sin\left(\frac{vb_s}{2 \times R}\right)}{\frac{vb_s}{2 \times R}}, \quad (14)$$

missä b_s on uran leveys staattorin hampaan kärjestä. Eli, vaikka ura olisi puolisoljettu, b_s on uran kapein auki oleva kohta. Staattorin sisäsäde on R . Näistä kolmesta kertoimesta saadaan lopullinen käämityskerroin

$$\xi_{\text{käämitys}} = \xi_v \xi_r \xi_u, \quad (15)$$

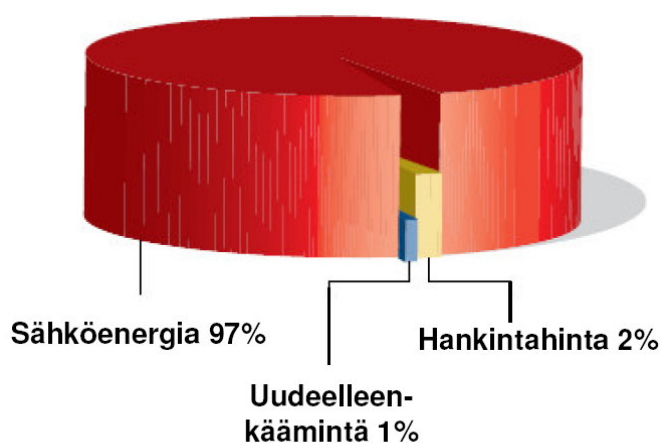
missä $\xi_{käämitys}$ on arvoltaan joko 1 tai sitä pienempi luku. Mitä lähempänä ykköstä käämityskerroimen arvo on, sitä suuremman momentin kone tuottaa. (Qian 2006, ss. 15-16.)

Liitteessä 1 on esitetty käämityskerroimet uraluvun ja napaluvun suhteen. Punaisella on merkitty tapaukset, jossa napaluku on yhtä suuri kuin uraluku ja näille tapauksille ei ole käämityskerrointa laskettu, koska niillä yhdistelmillä sähkökoneen toiminta olisi epästabiilia epäsymmetristen magneettisten vetovoimien takia.

Käämityskerroimien laskuissa on huomioitu ainoastaan ryhmäkerroin ja vyyhtikerroin, sillä urakerroin tarvitsisi uran konkreettiset mitat, jotta se voitaisiin näissä laskuissa huomioida. Kuten arvoista käy ilmi, kannattaa napaluku ja uraluku valita lähelle toisiaan, koska vain näillä yhdistelmillä saadaan hyvät käämityskerroimet. Mitä kauemmaksi napa- ja uraluvun yhteisiltä arvoilta mennään, sitä huonommaksi käämityskerroin menee.

3 STAATTORIN HYÖTYSUHDE

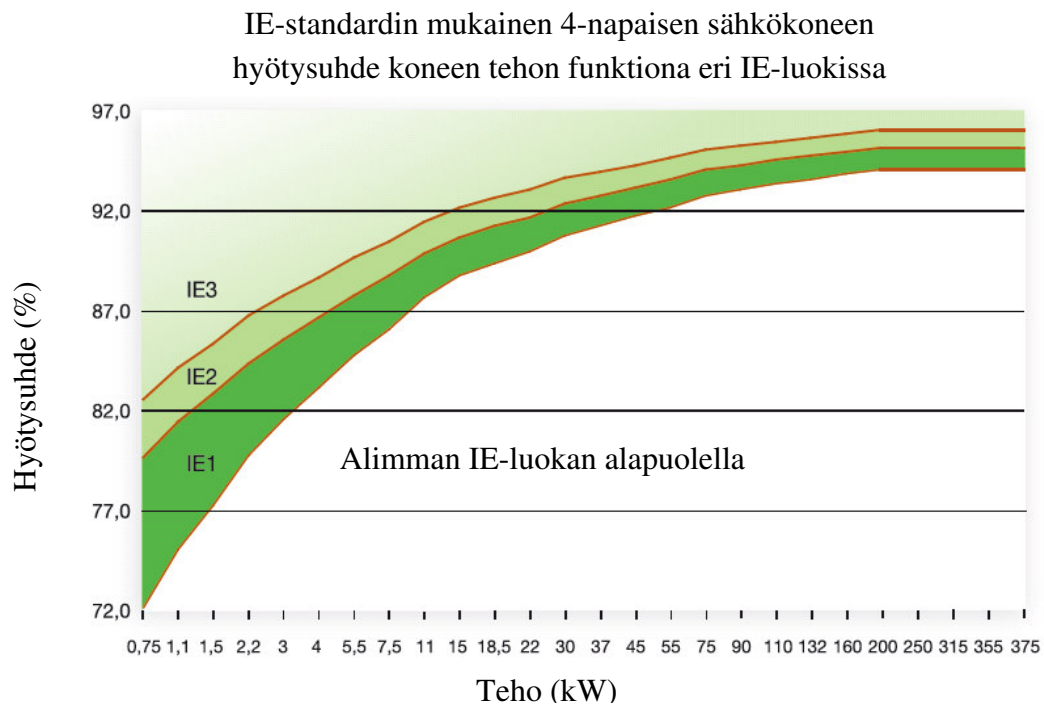
1960- ja 1970-luvuilla sähkökoneiden suunnittelussa suuressa roolissa oli raha, jolloin koneisiin käytettiin mahdollisimman vähän ja mahdollisimman halpoja materiaaleja. Tavoite oli vain, että se täyttää sille asetetut toimintavaatimukset. Hyötysuhde pidettiin sillä tasolla, että kone ei lämpene liikaa ja se toimii vielä normaalisti (Emadi 2005, s. 32). Niistä ajoista tähän päivään asti hyötysuhde on noussut merkittävään rooliin ja nykyään korkea hyötysuhde on sähkömoottoreita valmistavalle yritykselle kova myyntivaltti. Sähkömoottoreiden elinkaari on pidentynyt jopa vuosikymmeniin, jolloin kuvan 3.1 mukaan sähkömoottorin elinkaaren aikana 97% sen käyttökustannuksista syntyy pelkästään energiakustannuksista. Tällöin hyötysuhteella on erittäin suuri merkitys käyttökustannusten kannalta.



Kuva 3.1. Kuvaus siitä, miten sähkömoottorin käyttökustannukset sen elinkaaren aikana jakautuvat (Kortelainen 2010, s. 16).

Kuvassa 3.2 on esitetty nykyaikaiset IE-standardin (International Efficiency) mukaiset hyötysuhteet sähkömoottorin tehon suhteen. Uusi IE-standardi määrittelee kolme hyötysuhdeluokkaa, joihin sähkökoneen on sovittava. Luokat ovat IE 1 (Standard), IE 2 (High) ja IE 3 (Premium). Mitä suurempi IE-luokka on, sitä suuremmat hyötysuhdevaatimukset ovat. Uusissa IE-luokissa alimmalle IE 1-luokallekin on raja-arvo, joka sähkökoneen pitää saavuttaa. (Esselloo Exprês 2010, s. 11.)

Yleistettynä voidaan sanoa, että mitä suurempi teho sähkökoneesta saadaan irti, sitä suurempi hyötysuhde sillä on, mikä ilmenee myös kuvasta 3.2. Tämä ilmiö johtuu siitä, että suuremmalla koneella pieni lämpötilan muutos johtaa pienempiin käämityksen kuparihäviöihin verrattuna pienempään sähkökoneeseen (Auinger et al. 1980, s. 286.).



Kuva 3.2. Hyötysuhdekuvaaja IE-standardeista, minkä mukaan suuremmilla sähkökoneilla on oltava suurempi hyötysuhde (ABB Oy 2009).

Korkean hyötysuhteen sähkökone on lähes poikkeuksetta aina heikomman hyötysuhteen konetta kalliimpi. Materiaaleina voidaan esimerkiksi käyttää sähköisiltä ominaisuuksiltaan parempia staattorin levy materiaaleja, jotka ovat pinnoitteeltaan parempia ja paksuudeltaan ohuempia normaaliin nähden, jolloin pyörrevirta- ja lämpöhäviöt ovat pienempiä. Sähkökoneeseen voidaan myös valita kalliimpi laakerointi, jolloin kitkahäviöt ovat pienemmät ja hyötysuhde korkeampi. Korkean hyötysuhteen sähkökone on myös hiljaisempi käynniltään ja pitkäikäisempi alhaisemman käyntilämpötilansa johdosta. (Buschart 1979, ss. 507-510.)

Joissakin tapauksissa sähkökoneen ylityöskäyttö on perusteltua korkeamman hyötysuhteen vuoksi. Toisaalta ylityöskäytetyllä koneella kitkahäviöt ovat hieman suuremmat, mutta paremman tuuletuskyvyn ansiosta kone käy viileämpänä ja käämityksen kuparihäviöt ovat tällöin pienemmät. On arvioitu, että kun käämityksen lämpötila laskee 10 °C, pienenevät kuparihäviöt noin 4%. Suurempi kone on aina ostettaessa kalliimpi ja tällöin ylityöskäytetyn koneen hankkimista tulee miettiä tarkkaan. Yleensä ylityöskäytystä kannattaa harkita vasta silloin kun aikomuksena on hankkia teholtaan 50 kW:in tai sitä suurempi sähkökone. (Auinger et al. 1980.)

Tässä työssä käsiteltävän tuuligeneraattorin pyörimisnopeus on mitoitukseltaan vain noin 65 kierrosta minuutissa, jolloin mekaaniset häviöt ovat lähes mitättömät ja ne jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Olennaisin asia, jolla hyötysuhdetta voidaan nostaa, on staattorin häviöiden pienentäminen, johon tässä työssä keskitytään.

3.1 Hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät

Sähkökoneen häviöt voidaan jakaa mekaanisiin ja sähköisiin häviöihin. Mekaanisia häviöitä ovat tuuletin-, kitka- sekä laakerihäviöt, ja sähköisiä häviöitä ovat staattorin ja roottorin rauta- ja kuparihäviöt (Kortelainen 2010, s. 4). Jos sähkökone pyörii hitaasti niin mekaanisten häviöiden suuruus on todella pieni ja suurimmat häviöt tapahtuvat staattoriraudassa ja käämityksissä. Kuparikäämityksissä syntyy resistiivisiä häviöitä, joita kutsutaan myös kuparihäviöiksi. Staattorin raudassa syntyy pyörrevirta- sekä hystereesihäviöitä ja ilmvälissä magneettivuo ei ole tasainen vaan se sisältää häiriötä aiheuttavia yliaaltoja. Huolellisella suunnittelulla ja simuloimalla sähkökoneen toiminta eri toimintapisteissä voidaan etukäteen huomioida eri häviöiden vaikutukset ja niiden keskinäiset suuruudet. Esimerkiksi staattorin urien muodolla on iso merkitys häviöiden syntymismekanismiin, sillä jos staattorin hampaat ovat liian kapeita leveän uran vuoksi, hampaat lämpenevät liikaa ja kyllästyvät magneettisesti liian suuren magneettivuon tiheyden takia. Liian kapeasta hampaasta myös magneettivuo karkaa helposti hajavuona käämityksien läpi, vaikka sen pitäisi kulkea ilmväliin.

3.1.1 Hajavuo

Hajavuo on yksi vaikeimmin säädeltävistä asioista sähkömoottorissa, sillä sen syntymiseen vaikuttavat monet eri asiat ja niiden yhteisvaikutukset, joita on erittäin vaikea edes mitata tai laskea etukäteen. Hajavuohäviöt ovat kuormasta riippuvaisia ja niiden suuruuden on yleisesti arvioitu kasvavan neliöllisesti ulostulomomentin kasvaessa. Asiat, jotka vaikuttavat hajavuon syntymiseen, ovat esimerkiksi käämityksen suunnittelu, ilmvälin pituuden suhde roottorin uran auki olevan osan leveyteen, roottorin urien määrän suhde staattorin urien määrään, ilmvälivuon tiheys, staattorin ja roottorin hampaiden päiden ja pintamateriaalien laatu ilmvälissä sekä roottorin johtavien osien asennustapa. Moniin näihin asioihin voidaan kiinnittää erikseen huomiota, kuten valmistusvaiheessa materiaalien pinnan laatuun, mutta kun näillä edellämämainituilla asioilla on vielä yhteisvaikutuksia, on hajavuo ilmiönä erittäin haastava hallittava. Hajavuo ilmenee koneen toiminnassa muun muassa ylimääräisinä lämpöhäviöinä. (Emadi 2005, s. 40.)

3.1.2 Staattorikäämityksen resistiiviset häviöt

Virran kulkiessa staattorikäämityksessä, syntyy siinä aina resistiivisiä kuparihäviöitä, jotka synnyttävät lämpöä. Kuparin nousevan hinnan takia on mietitty käämitysten valmistamista alumiinista, jolloin tulevaisuudessa ei ehkä enää käytetä sanaa kuparihäviöt vaan resistiiviset häviöt. Staattorin resistanssi yhdelle johtimelle lasketaan kaavalla

$$R_s = \rho \frac{l_c}{a_c} (2N), \quad (16)$$

missä N on käämikierrosten lukumäärä, ρ johdinmateriaalin resistiivisyys, l_c johtimen keskimääräinen pituus (puolet käämin kierroksesta) ja a_c johtimen poikkileikkauspinta-ala. Resistanssin laskennassa on huomioitava myös käyttölämpötila ja taajuus, koska molemmilla on sitä kasvattava vaikutus. (Krishnan 2010, s. 103.)

Staattorin häviöt voidaan laskea kolmivaiheiselle sähkökoneelle hyödyntäen edellistä kaavaa (16) ja käyttäen staattorin vaihevirran tehollisarvoa I_s

$$P_{sc} = 3I_s R_s = 3\rho \frac{I_s^2}{a_c^2} (l_c a_c) (2N) = 3\rho J_c^2 V_c, \quad (17)$$

missä J_c on virrantiheys käämin johtimessa ja V_c käämimateriaalin tilavuus. Ne voidaan kirjoittaa erikseen muotoon

$$V_c = (l_c a_c) (2N) \quad (18)$$

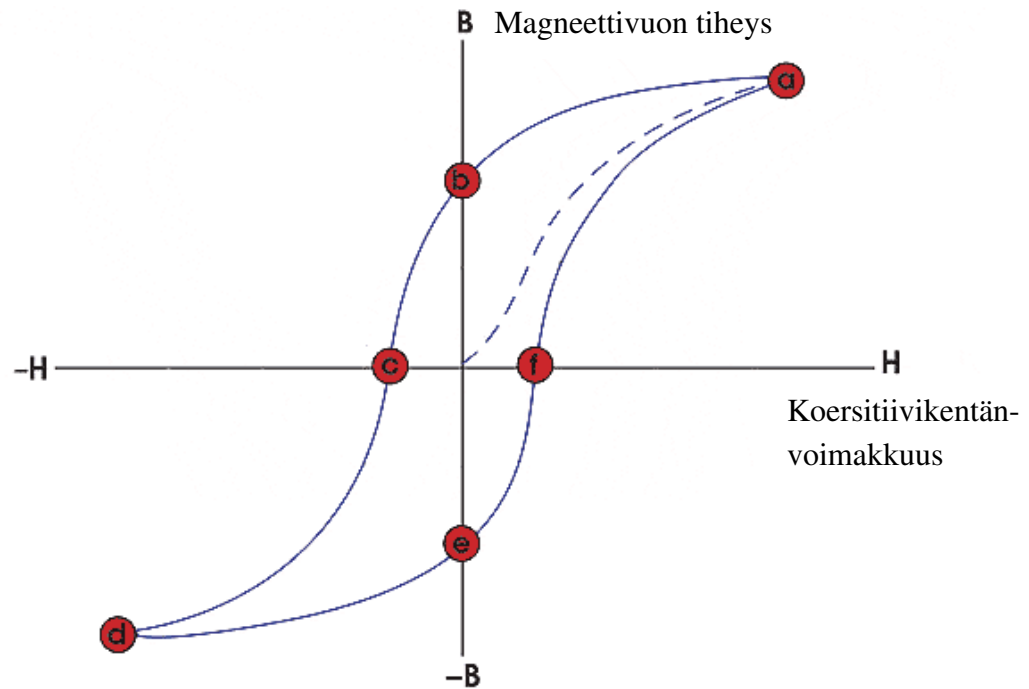
$$J_c = \frac{I_s}{a_c}, \quad (19)$$

joissa V_c :n yksikkö on m^3 ja J_c :n yksikkö A/m^2 . Resistanssi pienenee kun johtimen poikkipinta-ala kasvaa, jolloin myös virrantiheys pienenee. Resistiiviset häviöt kasvavat kun virrantiheys kasvaa, joten staattoriin tulisi valita aina mahdollisimman paksut johtimet resistiivisten häviöiden minimoimiseksi. (Krishnan 2010, s. 103.)

Sähkökoneen resistiivisiin häviöihin voidaan myös vaikuttaa sillä, että kytketäänkö saman vaiheen johtimet sarjaan vai rinnan. Jos kytkentä tehdään sarjaan niin käämityksessä kulkeva virta ja virrantiheys ovat pienempiä jos kuparimäärä pysyy samana. Jos taas käämitys tehdään rinnankytkettynä, vaaditaan suurempi virta jos kuparimäärä halutaan pitää samana. Koska kuparihäviöt kasvavat verrannollisena virran neliöön, kytketään käämitykset yleensä sarjaan, jolloin häviöt ovat pienempiä ja tarvitaan vähemmän kuparia käämitykseen. Myös käämivyyhtien rinnankytkentään voidaan päätyä, koska kytkentätapaan vaikuttaa sähkökoneelta vaadittava induktio.

3.1.3 Staattorin rautahäviöt

Staattorin rautahäviöt voidaan jakaa kahteen komponenttiin, joita ovat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöt, jotka molemmat syntyvät magneettivuon tiheyden vaihdellessa staattoriraudassa. Kuvassa 3.3 on esitetty raudan hystereesikäyrä, joka selittää raudan luontaista hystereesi-ilmiötä, jota voidaan verrata ilmiönä kitkaan. Hystereesihäviö on verrannollinen hystereesikäyrän sisäpuolelle jäävään pinta-alaan sekä taajuuteen, jolla silmukkaa kierretään (Parviainen 2000, ss. 10-12.)

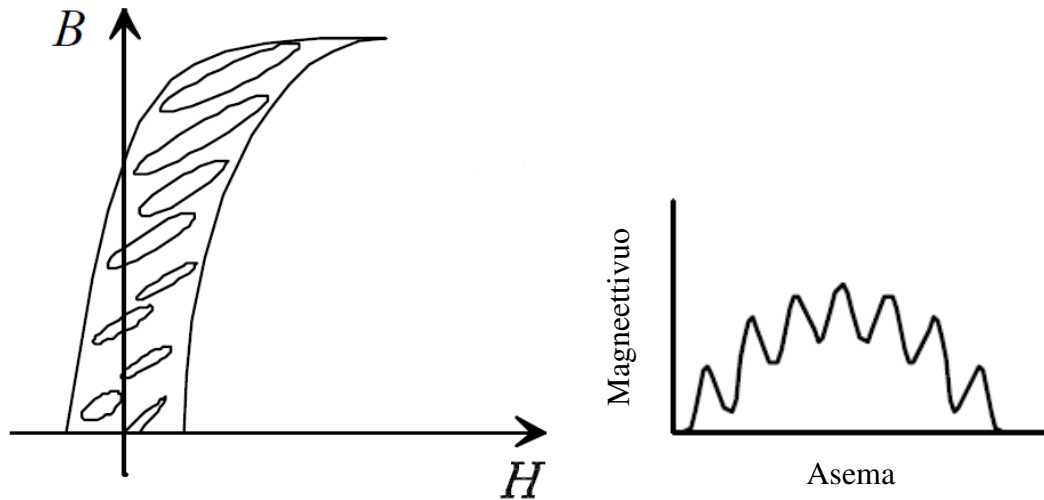


Kuva 3.3. Raudan B - H -käyrä, joka kuvaa hystereesi-ilmiötä. Mitä kauempana magnetoitumisreitti (siniset viivat) ovat toisistaan, sitä suurempi hystereesihäviö on (Kshirsagar 2010).

Katkoviivakäyrä kuvassa 3.3 kuvaa magneettivuon käyttäytymistä kun materiaali magnetoidaan ensimmäistä kertaa arvosta nolla täyteen kentänvoimakkuuteen. Kun kentänvoimakkuutta pienennetään pisteestä a lähtien, huomataan, että magneettivuon tiheys ei pienene katkoviivakäyrän mukaisesti. Materiaali jää magneettiseksi ja rautaan jää remanenssivuo B_r kun magneettikentän voimakkuus pienennetään nolnaan, jota piste b kuvaa. Materiaalia on vielä magnetoitava tästä pisteestä negatiiviseen suuntaan, jotta magneettivuon tiheys saataisiin nolaksi. Magneettivuon tiheys on nolla pisteessä c, jolloin se vastaa arvoa $-H_k$, jota kutsutaan koersitiivikentänvoimakkuudeksi. Kun kentänvoimakkuutta kasvatetaan tästä vielä lisää negatiiviseen suuntaan, kasvaa myös magneettivuon tiheys negatiiviseen suuntaan. Pisteessä d on saavutettu pistettä a vastaava negatiivinen magneettivuon tiheys. Kun kentänvoimakkuutta kasvatetaan jälleen arvoon nolla, tullaan pisteeseen e, jossa aineeseen jää magneettivuon tiheys $-B_r$. Se on nyt kuitenkin negatiivinen verrattuna pisteeseen b. Kun kentänvoimakkuutta lisätään edelleen positiiviseen suuntaan, saadaan tämä negatiivinen remanenssivuontiheys häviämään, jolloin päästään pisteeseen f. Kun kentänvoimakkuutta tästä vielä lisätään, päästään taas pisteeseen a. (Parviainen 2000, ss. 10-12.)

Hystereesikäyrä on kuvan 3.3 mukainen jos magneettivuojauma on sinimuotoinen. Sähkökoneissa käytetään yleisesti urituksia, jotka aiheuttavat magneettivuohon väreitä, jolloin hystereesikäyrään syntyy perussilmukan lisäksi paljon pieniä silmukoita, joita on kuvattu kuvassa 3.4. Perusaallon lisäksi magneettivuot sisältävät aina myös muita taajuuksikomponentteja, jotka aiheuttavat magneettivuohon

värettä. Väreestä johtuen hystereesisilmukan sisälle muodostuu pienempiä silmukoita, jotka lisäävät hystereesihäviöitä. Kuvassa 3.4 on tarkasteltu vain hystereesikäyrän positiivista puolikasta ja sen takia kuvaaja näyttää epäjatkuvalta, vaikka se todellisuudessa on jatkuva kuvan 3.3 mukaisesti. (Parviainen 2000, ss. 10-12.)



Kuva 3.4. Urituksen vaikutus magneettivuon muotoon. Uritus aiheuttaa magneettivuohon pientä värettä, joka näkyy hystereesikäyrällä ylimääräisinä pikkusilmukoina (Parviainen 2000, s. 12).

Kun magneettivuo vaihtelee sinimäisesti staattoriraudassa ajan suhteen, indusoituu staattorirautaan sähkömotorinen voima, joka synnyttää rautaan virran riippuen raudan resistanssista. Tämä syntynyt virta on nimeltään pyörrevirta ja se aiheuttaa häiriöitä sähkökoneen toimintaan. Pyörrevirtojen suuruus on suoraan verrannollinen indusoituneen sähkömotorisen voiman neliöön ja siten suoraan verrannollinen taajuuden ja magneettivuon tiheyden tulon neliöön. Eli mitä suuremmalla taajuudella sähkökone toimii, sitä enemmän pyörrevirtahäviöitä syntyy. Staattorin pyörrevirtahäviöt syntyvät hampaissa ja staattoriselässä. Magneettivuon tiheys staattorissa voidaan esittää seuraavasti

$$B = B_{peak} \sin(\omega t_1), \quad (20)$$

missä B_{peak} on magneettivuon tiheyden huippuarvo, ω kulmanopeus ja t_1 aika. Kun magneettivuon tiheys vaihtelee staattoriraudassa sinimuotoisesti, saadaan edellinen yhtälö muotoon

$$\frac{dB}{dt_1} = \omega B_{peak} \cos(\omega t_1), \quad (21)$$

jota käyttämällä saadaan keskimääräinen pyörrevirtojen häviötiheys

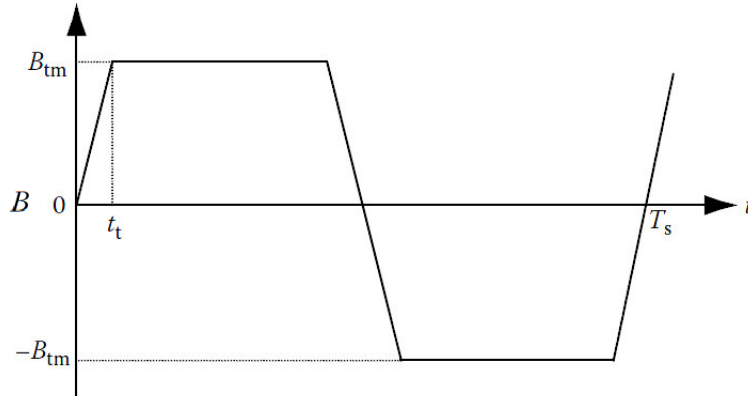
$$P_{ed} = \left(\frac{dB}{dt_1} \right)_{av}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{dB}{dt_1} \right)^2 d(\omega t_1) = \frac{(\omega B_{peak})^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2(\omega t_1) d(\omega t_1) = \frac{(\omega B_{peak})^2}{2}, \quad (22)$$

jonka yksikkö on $\frac{W}{kg}$. Tämä on yleinen pyörrevirtojen tehohäviön yksikkö varsinkin levyvalmistajien keskuudessa, mutta suunnittelijalle enemmän tietoa antaa häviötehon laskukaava

$$P_e = (\rho_i V) k_e (\omega B_p)^2 = (\rho_i V) 2k_e \left(\frac{dB}{dt} \right)_{av}^2, \quad (23)$$

jonka yksikkö on W. Siinä k_e on häviöverrannollisuuskerroin, ρ_i staattoriraudan tiheys sekä V staattoriraudan tilavuus. (Krishnan 2010, ss. 93-99.)

Kuvassa 3.5 on esitetty, kuinka magneettivuon tiheys käyttäytyy staattorihampaassa yhden jakson aikana. Magneettivuon tiheys nousee nolasta maksimiin kun roottorin magneetin N-napa ohittaa staattorin hampaan. Niin kauan kun hammas on täysin magneetin vaikutuksen alaisena, pysyy magneettivuon tiheys vakiona. Heti kun magneetin takareuna ohittaa hampaan, alkaa magneettivuon tiheys laskea ja päättyy arvoon nolla. Samalla tavalla käyttäytyy magneettivuon tiheys, mutta erimerkkisenä, kun magneetin S-pää ohittaa hampaan. Yhden syklin aikana on siis neljä erilaista magneettivuon tiheyden variaatiota ja näiden kaikkien aikana tapahtuu pyörrevirtahäviöitä. (Krishnan 2010, ss. 93-99.)

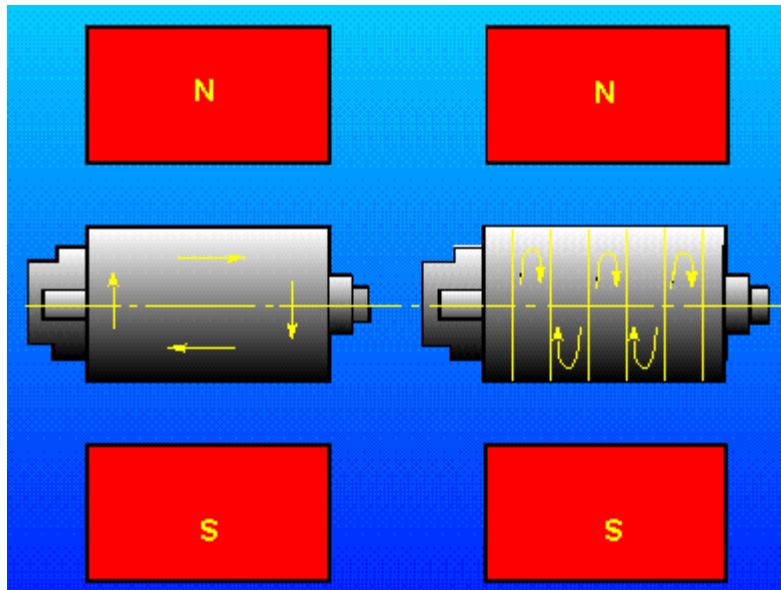


Kuva 3.5. Magneettivuon tiheyden vaihtelu staattorihampaassa yhden jakson ajalta. Pystyakselilla magneettivuon tiheys B ja sille positiivinen maksimiarvo B_{tm} sekä negatiivinen maksimiarvo $-B_{tm}$. Ajanhetkeä, jolloin magneettivuon tiheys saavuttaa positiivisen maksimiarvon, kuvataan termillä t_1 . Yhtä täyttää jaksoa, eli kun N- ja S-magneetit ovat ohittaneet yhden staattorihampaan, kuvaa termi T_s (Krishnan 2010, s. 95).

Pyörrevirtahäviöiden suuruuteen voidaan vaikuttaa merkittävästi muuttamalla hampaan magneettivuon tiheyden vaihtelua, joka onnistuu esimerkiksi muokkaamalla roottorissa sijaitsevien magneettien ulkomuotoa. Magneettien ulkomuotoa voidaan pyöristää, jolloin magneettivuon tiheyden aalto muuttuu sinimäisemmäksi, joka vähentää pyörrevirtahäviöitä. Pyörrevirtahäviöitä voidaan myös pienentää optimoimalla urien määrää ja niiden leveyttä niin, että kun uralukua napaa kohti vähennetään ja uran leveys asetetaan mahdollisimman lähelle hampaan leveyttä, pienenevät pyörrevirtahäviöt oleellisesti. Kun uraluku asetellaan mahdollisimman lähelle napalukua, tulee hampaan magneettivuon tiheys kolmion malliseksi aalloksi, joka on malliltaan lähellä siniaaltoa. Tällöin magneettivuon tiheyden vaihtelu saadaan pienemmäksi ja pyörrevirtahäviöt ovat pienemmät verrattuna aaltoon, joka on puolisuunnikkaan mallinen. Sähkökoneissa, joissa on useampi ura napaa kohti ja puolisuunnikkaan muotoinen magneettivuon tiheysaalto hampaassa, on moninkertaisesti pyörrevirtahäviöitä verrattuna koneeseen, jonka hampaissa on sinimuotoinen magneettivuon tiheysaalto. (Krishnan 2010, ss. 93-99.)

Pyörrevirtahäviöitä voidaan vähentää pienentämällä magneettivuon tiheyttä staattoriraudassa, mikä onnistuu esimerkiksi pidentämällä sähkökoneen aksiaalista pituutta. Tämä pienentää pyörrevirtahäviöitä painoyksikköä kohti. Koska samalla koneen paino kasvaa, ei häviöiden väheneminen ole suoraan verrannollinen koneen aksiaaliseen pidentämiseen. Samalla kun koneen magneettinen kuormitus laskee, pienenee magnetointivirta ja siten tehokerroin ei pysy enää samana. (Emadi 2005, s. 37.)

Pyörrevirtahäviöihin vaikuttaa johtavan aineen resistanssi ja resistanssin suuruuteen puolestaan vaikuttaa johtavan kappaleen poikkipinta-ala. Kuvassa 3.6 on kuvattu, miten pyörrevirtahäviöitä voidaan pienentää jos staattorissa käytetään laminoitua rautasydänrakennetta. Kohdassa A on käytetty yhdestä kappaleesta tehtyä staattorisydäntä, jossa pyörrevirrat pääsevät kiertämään koko koneen matkalla, jolloin pyörrevirtahäviöt ovat suuret. Kohdassa B on käytetty ohuista rautalevyistä tehtyä rakennetta, jossa pyörrevirrat pääsevät kiertämään vain yhdessä levyssä kerrallaan eikä koko koneen matkalla, jolloin pyörrevirtahäviöt ovat tällöin merkittävästi pienemmät. Laminoinnilla vaikutetaan siihen, että levyjen yhteenlaskettu resistanssi on huomattavasti suurempi pienen poikkileikkauspinta-alan takia verrattuna suureen yhtenäiseen staattorisydämeen, mikä tarkoittaa sitä, että laminoidussa rakenteessa esiintyy vähemmän pyörrevirtoja. (Integrated Publishing.)



Kuva 3.6. Laminoimattoman ja laminoidun staattorirakenteen vaikutus pyörrevirtojen käyttäytymiseen. Keskellä on staattorirautapaketti sekä ylhäällä ja alhaalla ovat magneetit, jotka synnyttävät staattorin läpi magneettivuon. Vasemmalla puolella on laminoimaton staattori ja oikealla on laminoitu, ohuista levyistä rakennettu staattori (Integrated Publishing).

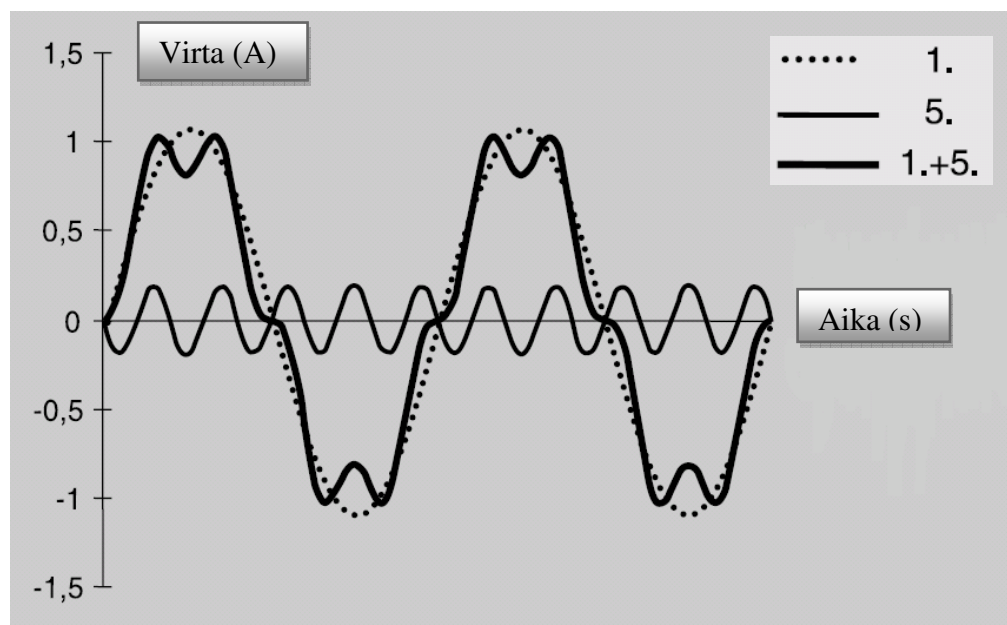
Laminoinnissa käytettävät levyt ovat erittäin ohuita, ohuimmat ovat paksuudeltaan vain 0.1 mm, jolloin niiden poikkipinta-ala on äärimmäisen pieni. Laminoidut levyt on tapana eristää toisistaan juuri sen takia, etteivät virrat pääse kulkemaan levyjen välillä. Pinnoitteina käytetään esimerkiksi ohutta lakkakerrosta tai levyn hapettamista. Pinnoituksen ei tarvitse olla kovin paksu, koska yhdessä levyssä vaikuttava jännite on niin pieni. Rautalevyyn voidaan myös saostaa piitä muutama prosentti mukaan, koska se pienentää sähköjohtokykyä ja samalla pyörrevirtoja, mutta liiallinen piin lisäys huonontaa raudan lujuusominaisuuksia ja heikentää magneettista johtokykyä (Piuholta 2003, s. 19). Jos käytetään erittäin ohuita piitä sisältäviä sähköteräslevyjä, voidaan päästä jopa 15-40 % pienempiin pyörrevirtoihin kuin paksumpia levyjä käytettäessä, joissa piitä ei ole. (Emadi 2005, s. 38; Integrated Publishing.)

3.1.4 Yliaallot

Yksi yleinen sähkökoneissa esiintyvä häiriö ja häviökomponentti on yliaallot. Yliaallot aiheuttavat lisääntyneitä lämpöhäviöitä, heilurimomenteja sekä värinä- ja ääni-ilmiöitä. Tahtikoneissa yliaaltojen aiheuttama häviöiden kasvu on suurempaa kuin epätahtikoneissa. Umpinapaiset tahtikoneet ovat herkempiä yliaalloille verrattuna avonapaisiin koneisiin, koska avonapaisilla koneilla voidaan pienentää yliaaltojen aiheuttamia roottorihäviöitä vaimennuskäämityksien avulla. Herkimpiä yliaalloille ovat suuret generaattorit, koska niitä käytetään usein maksimiteholla, jolloin niillä ei ole lisälämpenemiselle marginaalia. (Korpinen et al.)

Yliaallot voidaan jakaa kolmeen luokkaan, jotka ovat positiiviset-, negatiiviset- ja nollayliaallot. Positiiviset yliaallot (järjestysluku 1,4,7,10,13,...) aiheuttavat magneettikentän ja virran, jotka pyörivät samaan suuntaan sähkökoneen perusaallon kanssa. Negatiiviset yliaallot (2,5,8,11,14,...) aiheuttavat puolestaan virran ja magneettikentän, joka pyörii koneen omaan perusaaltoon nähden vastakkaiseen suuntaan. Nollayliaallot (3,9,15,21,...) eivät kehitä juurikaan momenttia, mutta aiheuttavat ylimääräisiä häviöitä koneessa. Positiivisten ja negatiivisten yliaaltojen keskinäinen vaikutus koneessa synnyttää akselia vääntäviä voimia, jotka ilmenevät akselin värinäilmiönä. Jos tämän akselia väräyttävän ilmiön taajuus on sama kuin akselin mekaaninen kierrostaajuus, vahvistuu värinäilmiö entisestään ja voi johtaa jopa sähkökoneen hajoamiseen. Tämän vuoksi onkin tärkeää kiinnittää yliaaltojen esiintymiseen huomiota jo koneen suunnitteluvaiheessa esimerkiksi simuloimalla järjestelmää etukäteen. (Sankaran 1999.)

Kuvassa 3.7 on havainnollistettu sitä, miten perusaalto muuttuu kun siihen summautuu mukaan yliaaltoja. Tässä tapauksessa on perusaalto, viides yliaalto ja niiden summa-aalto. Kuten kuvasta voidaan nähdä, on viides yliaalto taajuudeltaan viisinkertainen perusaaltoon nähden ja amplitudi on vain viidesosa perusaallon amplitudista. Kun viides yliaalto summautuu perusaaltoon mukaan, vääristyy perusaallon muoto ja siinä alkaa näkyä säröä, jolloin aalto ei ole enää puhtaasti sinimäinen. Todellisuudessa perusaaltoon summautuu paljon muitakin yliaaltoja, joten lopullinen aalto saattaa olla hyvinkin säröytynyttä ja kantikasta.



Kuva 3.7. Esimerkki siitä, miten kokonaisvirran aaltomuoto muuttuu kun perusaaltoon lisätään viides yliaalto mukaan (ABB 2001, s. 7).

Staattorin ja roottorin välisessä ilmapälissä vaikuttavat magneettivuon ajasta- ja tilasta riippuvat yliaallot, jotka synnyttävät vääntömomenttiin pientä väreä. Ajasta riippuvat yliaallot johtuvat moottorikäytön tapauksessa sähköä syöttävästä

taajuusmuutajasta ja tilariippuvaiset yliaallot syntyvät sähkökoneessa itsessään. Tämän vuoksi tässä työssä keskitytään vain tilariippuviin yliaaltoihin. Ne voidaan vielä luokitella kahteen alaluokkaan, joista toinen johtuu käämijohtimien asettelutavasta staattorin uriin eli käämityksen synnyttämistä yliaalloista ja toinen permeanssin vaihtelusta ilmapälissä, joka johtuu staattorin ja roottorin urien muodosta. Yleistettynä voidaan sanoa, että mitä suurempi vakoluku q on, sitä pienempiä ovat käämityksen synnyttämät yliaallot. Eli mitä leveämmälle yhden navan johtimet uriin asetellaan, sitä vähemmän yliaaltoja esiintyy. Tämä tarkoittaa sitä, että jos uraluku pysyy vakiona niin pienemmän napaluvun koneessa on vähemmän koneen toimintaa häiritseviä yliaaltoja sinimuotoisemman ilmapälivuon ansiosta verrattuna suuren napaluvun koneeseen. (Puranen 2006, ss. 22-24.)

Permeanssin vaihtelusta aiheutuvat yliaallot johtuvat urien muodosta ja jokaisen uran kohdalla permeanssi laskee hetkellisesti myös ilmapälivuon laskiessa. Mitä leveämpi ura siis on, sitä suurempi on magneettivuon ja permeanssin hetkellinen lasku, mutta jos urasta tehdään kovin kapea, kasvavat uran läpi ja hampaan pään kautta kulkevat hajavuot. Varsinkin induktiokoneilla hajavuo kasvaa kuormituksen kasvaessa, jolloin uran leveyden valintaan on suunnitteluvaiheessa kiinnitettävä huomiota. Uran leveyden valinta on aina kompromissi permeanssiyliaaltojen ja koneen mahdollisen ylikuormituskäytön välillä. Ilmapälin permeanssiyliaallot aiheuttavat myös pyörrevirtoja roottorin sekä siinä olevien magneettien pinnalle, jolloin ne lämpenevät ja syntyy häviöitä. Näiden syiden takia sekä induktio-, että kestopermagneetikoneissa käytetään yleensä puolisoljettua uraa. (Puranen 2006, ss. 22-24.)

Yksi perinteinen keino yliaaltojen vähentämiseen on joko staattorin urien tai roottorin kestopermagneettien asentaminen vinoon, yleensä yhden urajaon verran. Yleensä urat vinotaan roottorissa, koska se on valmistusteknisesti helpompaa. Toinen tehokas keino yliaaltoilmiötä vastaan on roottorin kestopermagneettien muotoilu, joka myös samalla vähentää momentin väärettä. Yleensä magneettien reunoja pyöristetään, jolloin ilmapäliin syntynyt magneettivuon tiheys on sinimäisempää. Tämän keinon yksi haittapuoli on se, että keskimääräinen magneettivuon tiheysarvo yhden urajaon yli on hieman heikompi, mutta tämäkin on taas kompromissi sen suhteen, kuinka paljon haittaa yliaaltojen esiintymisestä ilmapälissä on ja mihin tarkoitukseen sähkökonetta käytetään. (Puranen 2006, ss. 22-24.)

2-tasoiselle murtovakokäämitylle sähkökoneelle, jonka vakoluvun nimittäjä n on parillinen, pätee yhtälö

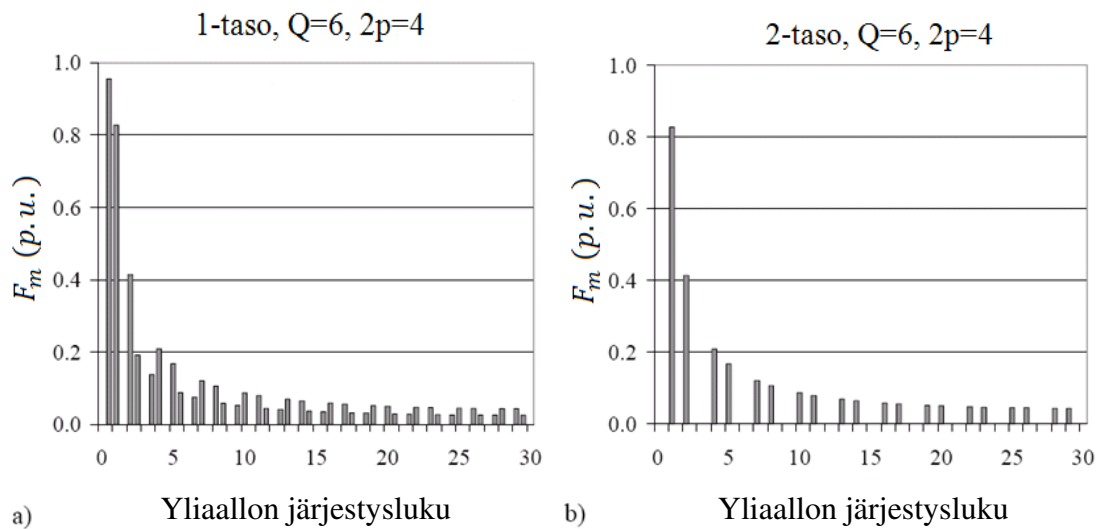
$$\frac{\mu}{p} = \pm \frac{1}{n} (2mg + 2) \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (24)$$

missä μ on yliaallon järjestysluku. Jos 2-tasoisesta murtovakokäämityksen sähkökoneen vakoluvun nimittäjä n on pariton, pätee

$$\frac{\mu}{p} = \pm \frac{1}{n} (2mg + 1) \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (25)$$

Plus- tai miinusmerkki valitaan edellisissä yhtälöissä sen mukaan, että harmonisen yliaallon järjestysluvusta μ tulisi positiivinen. Kokovakokäämityn koneen käämitys tuottaa aina yliaaltoja, joiden arvo on kokonaisluku, mutta murtovakokäämityn koneen käämitys tuottaa kokonaislukuyliaaltojen lisäksi myös yliaaltoja, joiden arvo on pienempi kuin 1. Yleensä kolmella jaolliset yliaallot puuttuvat, koska symmetrisessä 3-vaihekäytössä niiden sinimäiset aallot paikallisesti kumoavat toisensa. Sähkömotorisen voiman aaltomuodossa esiintyy yleensä parillisia yliaaltoja, jotka voivat kumota toisensa, jos vaiheiden vyyhdit on rakennettu yksittäisistä käämeistä. Tämä ilmiö tapahtuu erityisesti 2-tasomurtovakokäämityksillä, koska yhden navan käämivyyhti on siirretty π radiaania eteenpäin seuraavasta käämistä. (Salminen 2004, ss. 37-38.)

Kuvassa 3.8 on esitetty vertailua siitä kuinka paljon yliaaltoja esiintyy 1- ja 2-tasoisella murtovakokäämityksellä.



Kuva 3.8. Yliaaltojen aiheuttama sähkömotorinen voima F_m suhteellisarvona yliaallon järjestysluvun funktiona 1- ja 2-tasoiselle murtovakokäämitylle sähkökoneelle, jossa on 6 uraa ja 4 napaa (Salminen 2004, s. 48).

Kuten edellisestä kuvasta 3.8 voidaan havaita, esiintyvät yliaallot yleensä pareittain ja niiden amplitudi pienenee verrannollisena arvoon $\frac{1}{\mu}$. 6-uraisessa ja 4-napaisessa sähkökoneessa 1-tasomurtovakokäämityksellä on paljon enemmän yliaaltoja verrattuna 2-tasoiseen murtovakokäämitykseen koneeseen kuten yleinen teoriakin aiemmin osoitti. (Salminen 2004, ss. 47-48.)

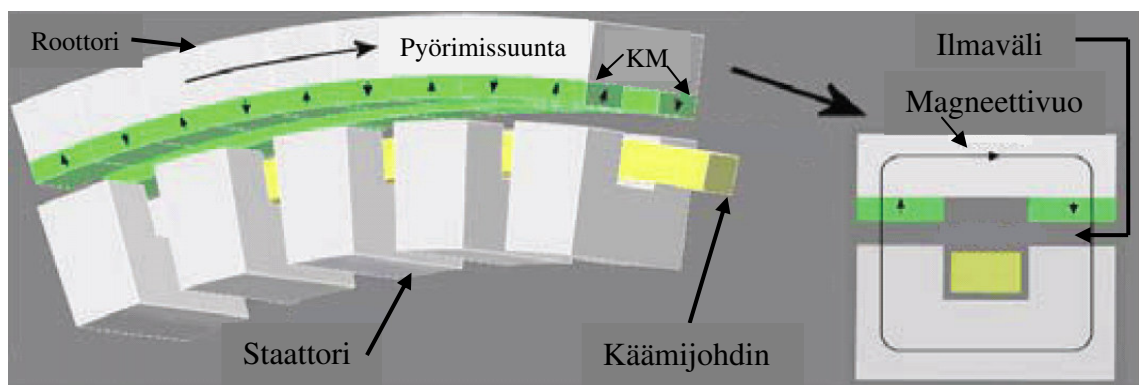
3.2 Poikittaisvuosähkökone

Yhtenä vaihtoehtona korkeaa hyötysuhdetta ajatellen tutkittiin tässä työssä myös täysin erilaista sähkökonetyyppiä, joka on poikittaisen vuon sähkökone (transversal flux machine). Poikittaisvuokone sopii sellaiseen käyttöön, jossa roottori pyörii hitaasti,

pyörimisnopeudet vaihtelevat usein ja momentti on korkea, joten esimerkiksi tuulisovelluksiin tällainen konetyyppi olisi ihanteellinen. Tyypillistä tällaiselle konetyypille on, että tehotehiheydet ovat erittäin korkeita, jopa kaksinkertaisia normaaleihin induktiokoneisiin verrattuna ja kolminkertaisia kestopagneettikoneisiin verrattuna. Staattorin napaluku näissä koneissa on aina suuri ja yleensä se on puolet roottorin kestopagneettien määrästä. Poikittaisen vuon sähkökoneella on muutamia heikkouksia, kuten esimerkiksi siniaallosta poikkeava hammasvääntömomentti, vaiheet eivät yleensä ole symmetriset, erittäin pieni tehokerroin suuren hajavuon vuoksi, vain osittainen kestopagneettien käyttö ja monimutkainen rakenne. Hajavuota voidaan pienentää roottorin muotoilulla, jolloin myös tehokerroin paranee. Varsinkin generaattorikäytöissä alhaiseen tehokertoimeen on kiinnitettävä huomiota ja sitä voidaan nostaa taajuusmuuttajan avulla. (Adler et al, s. 1; Blissenbach et al, s. 28; Vio-rel, s. 5.)

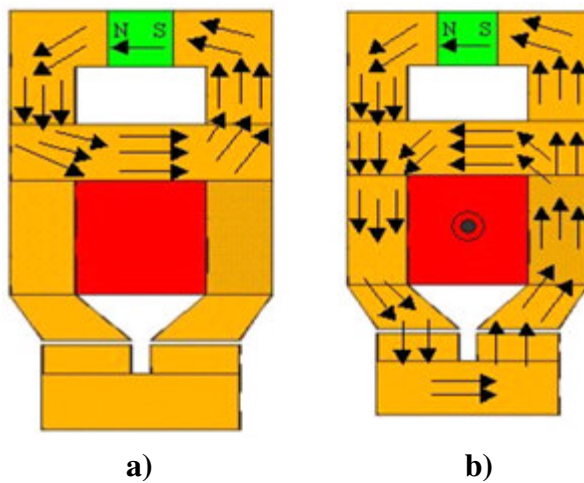
Tyypillinen piirre poikittaisvuokoneelle on, että tietyissä sen osissa magneettivuo kulkee poikittain pyörimissuuntaan nähden. Toinen perinteisestä konetyypistä eroava ominaisuus on renkaan muotoinen staattorikäämitys, jossa virran kulkusuunta vastaa roottorin pyörimissuuntaa. Tällaisen rakennetyypin ansiosta koneella saavutetaan erittäin suuri tehotehiheys, jolloin koneen koko on pienempi verrattuna normaaliin konetyypisiin. Tällä konetyypillä on myös suuri hyötysuhde, joka johtuu pienistä kuparihäviöstä, koska perinteisiä kääminpäitä ei staattorissa ole, ja siitä, että magneettinen ja sähköinen piiri eivät kulje samaa reittiä. (Adler et al, s. 1.)

Poikittaisvuokoneelle on monia erilaisia rakenneratkaisuja, joissa roottori voi pyöriä ulkokehällä, sisäkehällä tai staattorin sisällä. Nämä rakenneratkaisut on yleensä toteutettu joko reluktanssiperiaatteella tai sitten kestopagneettien avulla. Kuvassa 3.9 on esitetty kestopagneettien avulla toteutettu rakenneratkaisu, jossa roottori pyörii ulkokehällä ja staattori on kiinteänä sisäkehällä. Vihreä osa kuvaa kestopagneetteja, keltainen käämistystä ja vaalea osa staattorirautaa. (Adler et al, s. 2.)



Kuva 3.9. Periaatekuva poikittaisvuokoneen kokoonpanosta. Alhaalla paikallaan oleva staattori ja yläpuolella liikkuva roottori, jossa myös kestopagneetit (KM, kuvassa vihreällä) sijaitsevat. Käämijohdin on kuvattu keltaisella. Kuvan oikealla puolella on esitetty magneettivuon kulkusuunta ja ilmaväli (Adler et al).

Rakenneratkaisultaan erittäin toimivaksi on osoittautunut se, että paikallaan olevassa staattorissa sijaitsevat sekä käämitys, että kestopagneetit, josta esimerkki on kuvassa 3.10. Tällöin kestopagneetit ovat suojassa mekaaniselta värinältä, nopeilta liikkeen muutoksilta ja jännityksiltä. Koska magneetit on kiinnitetty suoraan koneen kiinteään runkoon, pääsee lämpö myös johtumaan suoraan pois eikä kulje tällöin ilmvälin kautta, kuten normaalisti. Jos kestopagneetit sijaitisivat roottorissa, jouduttaisiin niitä todennäköisesti jäädyttämään esimerkiksi lisäpuhaltimella, joka alentaisi koneen hyötysuhdetta. Reluktanssiperiaatteella toimiva poikittaisvuosähkökone tarvitsee enemmän napoja ja sillä on pienempi voimatiheys verrattuna kestopagnetoiuun poikittaisvuokoneeseen. Toisaalta kestopagneettien puuttuminen tuo säästöjä materiaali- ja kokoonpanokustannuksissa. (Adler et al, s. 2.)

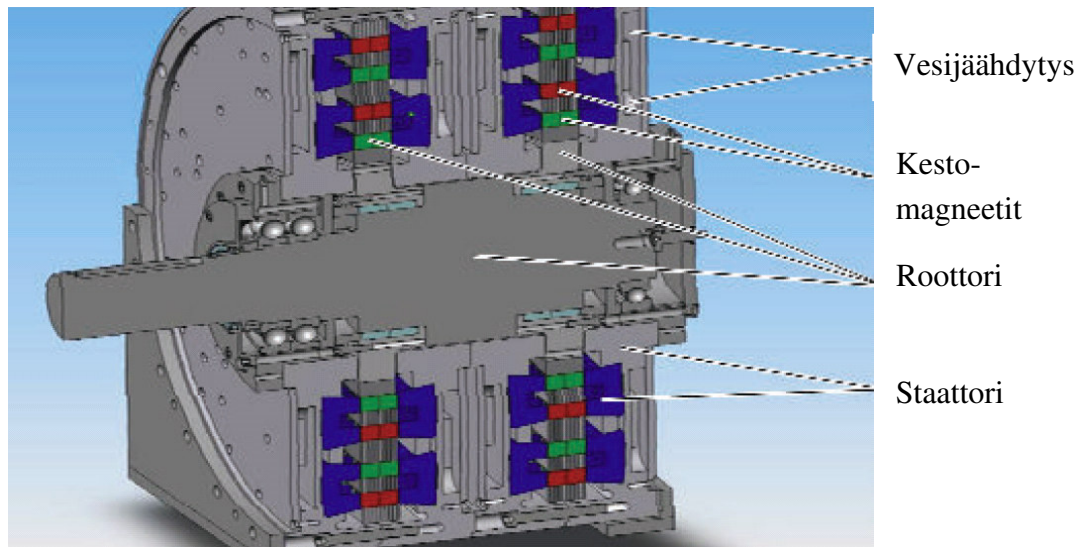


Kuva 3.10. Periaatekuva poikittaisvuokoneen toiminnasta, missä kuva a) esittää magneettivuon (mustat nuolet) kulkua rakenteessa kun punaisessa käämijohtimessa ei kulje virtaa. Kuva b) esittää magneettivuon kulkua rakenteessa kun käämijohtimessa kulkee virta. Rakenteen yläosa on paikallaan oleva staattori, jossa sijaitsevat käämijohtimet sekä kestopagneetit (vihreällä merkitty) ja alaosa kuvaa liikkuvaa roottoria. Staattorin ja roottorin välissä on ilmväli. Kestopagneeteilla magneettikenttä kulkee fysiikan lakien mukaan aina navasta N napaan S ja käämijohtimessa virta, jonka kulkusuunta on tasosta kohtisuoraan ylös, synnyttää rakenteeseen vastapäivään kiertävän magneettikentän. Kuvassa b) käämijohtimen synnyttämä magneettikenttä on kestopagneettien magneettikenttää voimakkaampi, jolloin resultanttimagneettivuoto kiertää roottorin kautta (Blissenbach et al 2002, s. 29).

Tällä hetkellä poikittaisvuotekniikalla valmistettu kestopagneettiperiaatteella toimiva sähkökone voi saavuttaa momenttitiheyden $150 \frac{kN}{m^3}$. Vertailun vuoksi normaalille kestopagneetikoneelle momenttitiheyden arvo on maksimissaan noin $60 \frac{kN}{m^3}$ ja normaalille induktio-koneelle $20-30 \frac{kN}{m^3}$. (Adler et al, s. 2.)

Kuvassa 3.11 on kuvattu vesijäädytetty kestopagneettiperiaatteella toimiva poikittaisvuosähkökone. Roottorissa on yhteensä neljä kestopagneettiriviä, joista kaksi

on aina keskenään yhtä etäällä roottorin keskiviivasta. Roottorin siivekkeitä on myös pyörytetty keskenään 90° , jolloin kaikkien vaiheiden välillä on vaihesiirto ja koneella on tällöin 4 napaa. (Adler et al, s. 2.)



Kuva 3.11. Halkaistu rakennekuva vesijäähdytetystä poikittaisvuokoneesta. Keskellä on roottori, josta ulottuu lähelle koneen ulkokehää ohuet siivekkeet, joissa on kestmagneetit (punainen ja vihreä). Staattoriin kuuluvat osat on merkitty sinisellä (Adler et al, s. 2).

Tätä konetyyppiä tutkittiin siis yhtenä tuuligeneraattorivaihtoehtona, mutta siihen ei kuitenkaan päädytty sen haasteellisen toteuttamisen ja aikaa vievän suunnittelun vuoksi. Tällä konetyypillä on myös suuri momentin rippeli, minkä vuoksi koneen käynnissä voi esiintyä värinää ja melua. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, on koneen tehokerroin erittäin alhainen, noin 0.3 – 0.5 joka ei ole tällaisessa tuuligeneraattorikäytössä suotavaa.

4 MURTOVAKOKÄÄMITYN GENERAATTORIN PROTOTYYPIT

Nykyään ollaan siirtymässä yhä enemmän uusiutuviin energiamuotoihin, joihin myös tuulienergia kuuluu. Tuuliturbiineissa on tapana käyttää turbiinin ja generaattorin välissä vaihteistoa, jotta pyörimisnopeus saadaan korotettua generaattorille sopivaksi. Vaihteisto vaatii aina kuitenkin huoltoa, se tuottaa häviöitä sekä nostaa kokonaishintaa. Tuulivoimatekniikassa trendinä on pyrkiä vaihteistosta eroon, jolloin generaattorilta vaaditaan hidasta pyörimisnopeutta. Tuulen nopeuden vaihdellessa myös generaattorin pyörimisnopeus vaihtelee, jolloin generaattorin tuottama taajuus vaihtelee, mikä voidaan kompensoida asentamalla generaattorin ja sähköverkon väliin taajuusmuuttaja, jolla syöttötaajuus sähköverkkoon voidaan pitää vakiona.

ABB on jo aikaisemmin tehnyt murtovakokäämityksellä toteutetun 32-napaisen ja 36-uraisen tuuligeneraattoriprototyypin (prototyyppi A), jonka nimellinen pyörimisnopeus on 65 rpm ja nimellisteho 20 kW. Tämän työn tarkoituksena on rakentaa tämän prototyypin rinnalle uusi generaattoriprototyyppi (prototyyppi B), joka toimii paremmalla hyötysuhteella prototyyppiin A nähden. Tarkoitus on vertailla näiden prototyyppien ominaisuuksia keskenään koeajossa kun roottorina käytetään molemmissa samaa 32-napaista kestopagneettia roottoria. Jatkossa aiemmin tehdystä vanhemmasta prototyypistä käytetään nimeä prototyyppi A ja uudesta ratkaisusta prototyyppi B.

4.1 Prototyyppien roottori

Roottorilevyt on valmistettu M600-50A –sähköteräslevystä laserilla leikkaamalla, jonka jälkeen ne on liitetty kahdeksan tangon avulla yhteen. Tankojen kiristysvaiheessa ongelmia tuotti se, että levyt eivät pysyneet suorassa vaan alkoivat kiertymään. Lopuksi levyt saatiin asennettua suoraan. Koneen sähköisten ominaisuuksien ja kestopagneettien pinta-asennuksen kannalta on erittäin tärkeää, että kaikki roottorilevyt ovat täysin samassa asennossa keskenään.

Kuvassa 4.1 on esitetty roottori kestopagneettien liimausvaiheessa. Kestopagneetteja varten oli levyyn jo suunnitteluvaiheessa tehty matala ura, johon magneetit voidaan sijoittaa. Magneettimateriaalina on käytetty neodyymiä (NdFeB). Magneetit kiinnitettiin käsin liimaamalla, mikä ei mekaanisen kestävyys kannalta ole ongelma pienen pyörimisnopeuden ansiosta. Myöskään roottorin ympärille kieputettavaa hartsinauhaa ei nyt samasta syystä tarvita. Hartsinauha myös rikkoutuisi kun roottori vedetään koneesta ulos. Roottorin molempiin päihin on laitettu levyt, joiden väliin sähköteräslevyt on asetettu ja kiristetty.



Kuva 4.1. Kuva roottorista kestomagneettien asennusvaiheessa. Kestomagneetit kiinnitettiin roottoriin käsin liimaamalla.

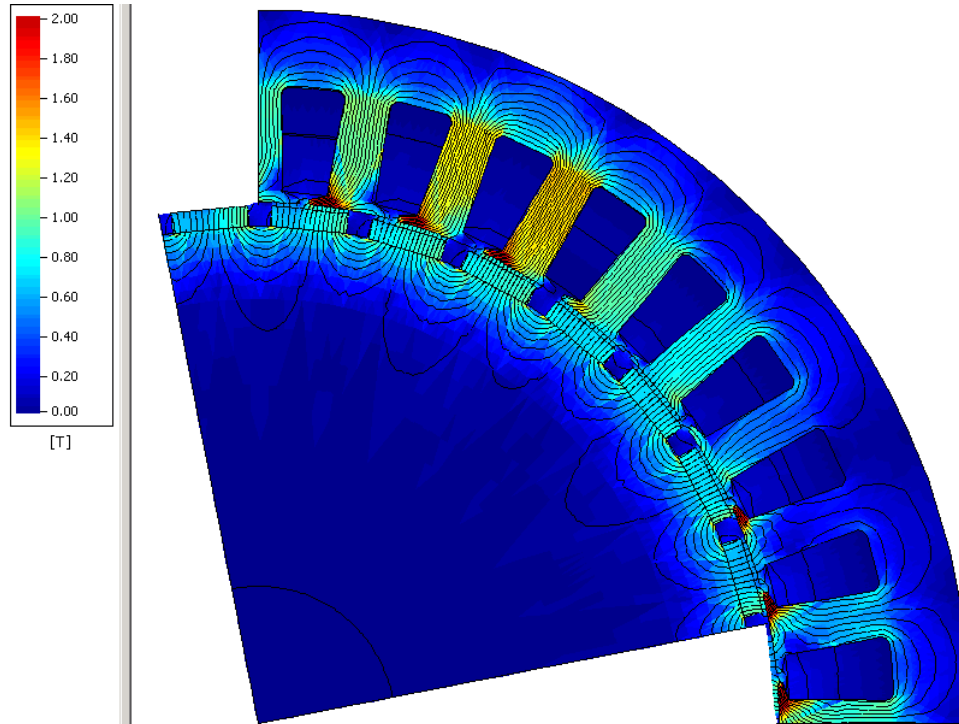
Prototyyppien rakennusvaiheessa haastetta tuo aina se, että juuri prototyypin kaltaiselle sähkökoneelle ei ole tuotantolinjaa valmiina vaan joitakin vaiheita joudutaan tekemään käsin, jolloin valmistus etenee hitaasti ja virheitä voi tapahtua enemmän kuin automatisoidulla tuotantolinjalla. Myös joissakin työvaiheissa joudutaan soveltamaan eri tekniikoita, millä prototyyppi saadaan kasattua, koska valmiita työkaluja ei aina löydy.

4.2 Prototyypin A staattori

Tämä prototyyppi A on siis lähtökohta, jota lähdetään kehittämään paremmaksi. Apuna käytetään Adept-ohjelmistoa, jolle annetaan staattorin ja roottorin tarkat ominaisuudet ja materiaalit, jonka jälkeen ohjelma suorittaa koneelle nopeasti läpilaskennan useassa toimintapisteessä. Sähkökoneen parametreja muuttamalla voidaan vertailla laskentatuloksia keskenään ja etsiä sopiva ratkaisu huomioiden, että hyötysuhde pysyy hyvänä ja kone vielä toimii. Adept näyttää myös magneettivuon tiheyden, jolloin on helppo seurata, että magneettivuon tiheys esimerkiksi hampaassa tai staattoriselässä pysyy sallituissa lukemissa. Toimivalle sähkökoneelle voidaan asettaa rajaksi, että staattoriselässä ja hampaassa magneettivuon tiheyden arvo ei ylitä 1,5 T.

Prototyypin A staattorimallista on Adept-laskentaohjelman kuvaleikkaus kuvassa 4.2. Kuvassa näkyvät hyvin mustat magneettivuoviivat, staattori, roottori ja se, kuinka magneettivuon tiheys staattoriraudassa käyttäytyy. Huomataan, että staattorirauta kyllästyy aivan hampaiden päistä, missä magneettivuon tiheys on jopa 2,3 T. Hampaan

juuressa magneettivuon tiheys on maksimissaan noin 1,46 T ja staattoriselässä maksimissaan vain noin 0,4 T. Koska magneettivuo staattoriselässä on näin pieni, olisi staattoriselkää mahdollista vielä ohentaa, jolloin uraan saataisiin enemmän kuparia ja hyötysuhdetta tällöin hieman korotettua.



Kuva 4.2. Kuvaleikkaus Adept-laskentaohjelmiston tuottamasta mallista, jossa näkyvät mustalla magneettivuoviivat, staattori, roottori sekä uran muoto. Magneettivuon tiheys on esitetty väreissä.

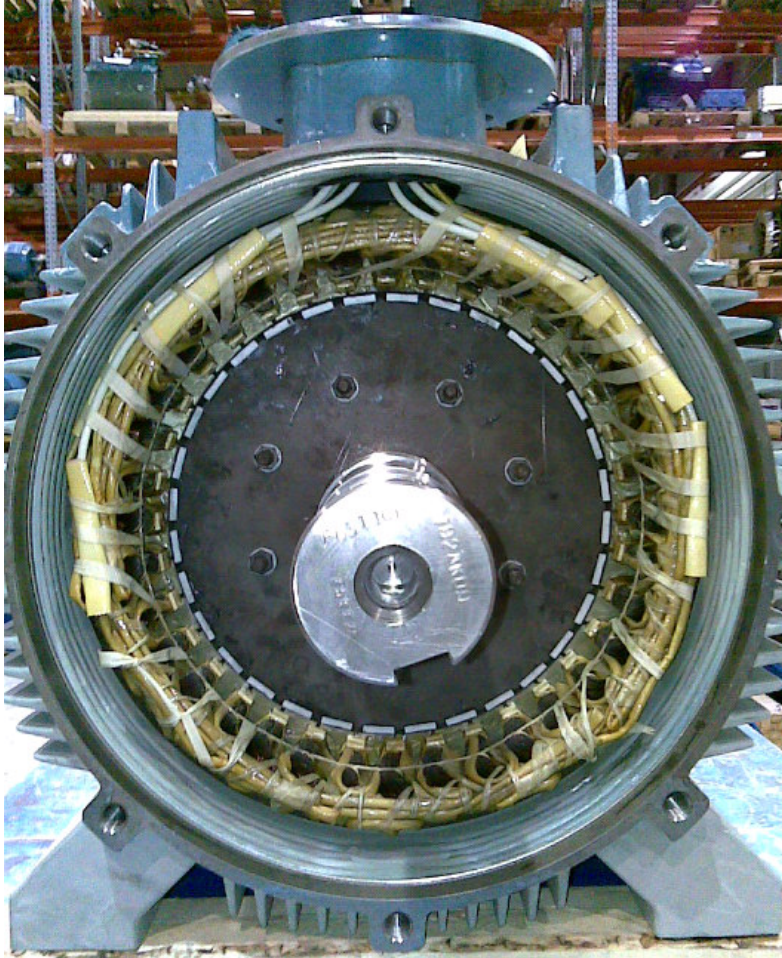
Käämityksenä on 2-tasomurtovakokäämitys, jossa toinen vyyhdenpää on aina ylätasolla ja toinen alatasolla. Ylätaso on lähempänä ilmaväliä ja alataso uran pohjalla. Vakoluku tälle käämitykselle on 3/8 ja perusaallon käämityskerroin 0,945 eli hyvin korkea. Käämityksen kytkentäkaavio on kuvattu taulukossa 4.1, jossa on esitetty vain 1 käämitysjakso, koska yhteen jaksoon tarvitaan vain 9 uraa ja sen jälkeen käämitys esiintyy jaksollisesti aina 9 uran välein. Koska nyt uria on yhteensä 36, koostuu käämitys neljästä samanlaisesta jaksosta.

Taulukko 4.1. Ote prototyypin yhdestä käämijaksosta. Yläkerros on lähinnä ilmaväliä. Käämivyyhden toinen pää on aina yläkerroksessa ja toinen alakerroksessa.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
YLÄKERROS	+A	-A	-B	+B	-B	-C	+C	-C	-A
ALAKERROS	+A	-A	+A	+B	-B	+B	+C	-C	+C

Kuvassa 4.3 on kuva prototyypigeneraattorista, jossa roottori on asennettu paikoilleen. Ilmaväli on 1,3 mm. Laakerikilpien asennusvaiheessa roottori keskittyy automaattisesti keskelle staattoria, mutta kuvassa roottori makaa vapaasti staattorin

päällä. Alle 1 mm ilmavälillä roottorin asentaminen olisi jo erittäin haasteellista, koska välys on todella pieni kun huomioidaan koneen suuri halkaisija ja koko. Pienen väläksen ansiosta roottorin pinnalla olevat kestopagneetit saattavat myös vaurioitua siinä vaiheessa kun roottoria työnnetään koneen sisälle tai vedetään sieltä ulos.



Kuva 4.3. Kuva prototyypistä A, jossa roottori on asennettu ilman laakerikilpiä paikoilleen. Kuvassa on näkyvissä myös vyyhdenpää, jotka on käämintävaiheessa jätetty hieman liian pitkiksi.

Kuvassa 4.3 on näkyvissä myös vyyhdenpää, joka olisi ollut mahdollista tehdä hieman lyhyemmäksi. Nyt vyyhdenpää on jätetty tarpeettoman pitkäksi, jolloin käämikuparia kuluu enemmän ja kuparihäviöt ovat hieman suuremmat. Tosin kun käämitys on tehty käsityönä, on kuparilankoja ollut helpompi käsitellä ja väännellä paikoilleen kun vyyhdenpäähän on jätetty hieman ylimääräistä pituutta.

4.3 Hyötysuhteen parantaminen

Prototyypin A sähköinen laskelma generaattorina on esitetty liitteessä 2, josta huomataan, että hyötysuhde on vain 79,4 %. Se on sähkökoneelle suhteellisen alhainen lukema, jota pitäisi saada paljon korotettua. Kun katsotaan häviöiden suuruuksia, on

suurin häviötyyppi käämityksen resistiiviset häviöt. Mekaaniset häviöt ja rautahäviöt ovat todella pienet kuparihäviöihin nähden, joten tällaisella hitaasti pyörivällä sähkökoneella suurin hyötysuhteen nosto saadaan kun löydetään keino kuparihäviöiden pienentämiseen.

Hyötysuhdetta yritettiin aluksi nostaa simuloimalla sähkökonetta erilaisilla napa- ja uraluvun yhdistelmillä, joille piti aluksi suunnitella uudet käämitykset. Näillä muutoksilla ei ollut juurikaan oleellista parannusta hyötysuhteeseen, joten tässä vaiheessa ura- ja napaluvun muuttamiselle ei ollut perustella syytä. Lisäksi jos napalukua olisi lähdetty muuttamaan, olisi pitänyt valmistaa ja suunnitella täysin uusi roottori. Nyt kun napalukua ei muuteta, voidaan koeajoissa käyttää samaa roottoria molemmissa staattoreissa, jolloin saadaan paras mahdollinen staattorien keskinäinen vertailu.

Kaikkein oleellisin parannus hyötysuhteeseen tuli kun staattoriuran muotoa muutettiin. Ura tehtiin juuresta 3 mm ja keskeltä 2 mm leveämmäksi ja syvyyttä oli mahdollista lisätä jopa 12 mm prototyyppiin A nähden. Uran suurentaminen parantaa hyötysuhdetta, koska tällöin sinne mahtuu enemmän kuparia, jolloin johtimissa kulkevaa virtaa voidaan pienentää saman magneettivuon saamiseksi ja kuparihäviöt pienenevät. Uran suurentamisessa voi myös helposti mennä liiallisuuksiin suuren hyötysuhteen toivossa, koska mitä vähemmän staattorirautaa jää jäljelle, sitä heikommaksi koneen toiminta muuttuu. Jos urasta tehdään liian leveä, tulevat hampaat liian kapeiksi ja magneettivuon tiheys niissä nousee liian korkeaksi, jolloin koneen toiminnassa esiintyy enemmän yliaaltoja ja lämpenemistä. Uran syventämisessä ongelma tulee vastaan liian ohuessa staattoriselässä, jolloin magneettivuon tiheyden arvo kasvaa liian korkeaksi ja magneettivuolla on mahdollisuus hypätä staattoriraudasta koneen runkoon, jolloin koneen rungosta tulee toiminnan aikana magneettinen siinä kulkevan hajavuon takia. Tämä ongelma on tosin suurempi jos napaluku on pienempi, jolloin magneettivuo kulkee staattoriselässä pidemmän matkan, mutta tämä ilmiö pitää ottaa silti suuremman napaluvun tapauksessakin huomioon. Jos staattorirautaa vähentää liikaa, tulee ongelmaksi lämmönsiirto koneesta ulos. Toinen ongelma seuraa siitä, että liian ohutta staattorirautapakettia on hankala käsitellä nidontavaiheessa. Liian ohut levypaketti ei pysy kasassa kun se puristetaan koneen runkoon. Tämä ongelma on tosin mahdollista välttää lämmittämällä koneen runko etukäteen kuumaksi, jolloin lämpölaajanemisen ansiosta rautapaketti on helpompi asentaa rungon sisään.

Hyötysuhdetta voi myös kasvattaa suurentamalla roottorin magneettien kokoa eli tässä tapauksessa paksuutta ja leveyttä, koska pituus on määrätty runkokoon vuoksi vakioksi. Magneettien leveyttä kasvattamalla ongelmaksi tulee kokoonpano, koska ne eivät saa sijaita liian lähellä toisiaan magneettisten voimien vuoksi. Magneetit on tällöin hankala asentaa roottoriin jos ne sijaitsevat liian lähellä toisiaan, koska vierekkäisten magneettien magneettiset voimat yrittävät aina pyöryttää magneetit eri asentoon liimausvaiheen aikana. Päätelmä magneettien koon muuttamisesta oli kuitenkin vain teoreettinen, koska tarkoitus on pitää roottori samana ja tehdä muutokset ainoastaan staattoriin.

Hyötysuhteeseen voidaan vaikuttaa muuttamalla staattorin sähköteräslevyn materiaalia, sillä yleisesti M600-50A –levyä käytettäessä hyötysuhde on hieman huonompi kuin käytettäessä M400-50A –levyä. Levyä vaihtamalla voidaan vaikuttaa pyörrevirtojen suuruuteen, mutta kun tässä tapauksessa kyseessä on hitaasti pyörivä sähkökone, jonka taajuus on vain 17,3 Hz, ovat levyjen väliset erot aivan minimaaliset. Adeptin mukaan M400-50A levyllä laskettuna koneen hyötysuhde oli vain 0,1 % parempi kuin levyä M600-50A käytettäessä. Koska M600-50A –levy on yleisempi ja halvempi, päätettiin staattorilevyt valmistaa siitä laser-leikkaamalla.

Myös käämityksien kytkentätapaa yritettiin muuttaa, mutta siitä ei ollut mitään apua hyötysuhteen nostoon. Käämitys on edelleen järkevintä kytkeä sarjaan, koska rinnankytketyillä käämivyyhdeillä virta joudutaan saman magneettivuon saamiseksi kasvattamaan todella suureksi, jolloin häviöt ovat suuret ja hyötysuhde alhainen. Koneita yritettiin myös laskea 1-, 2- ja 6-vaiheisena. Ennen laskentaa näille vaiheluvuille piti suunnitella uudet käämitykset. Hyötysuhde ei näillä ratkaisuilla kuitenkaan noussut.

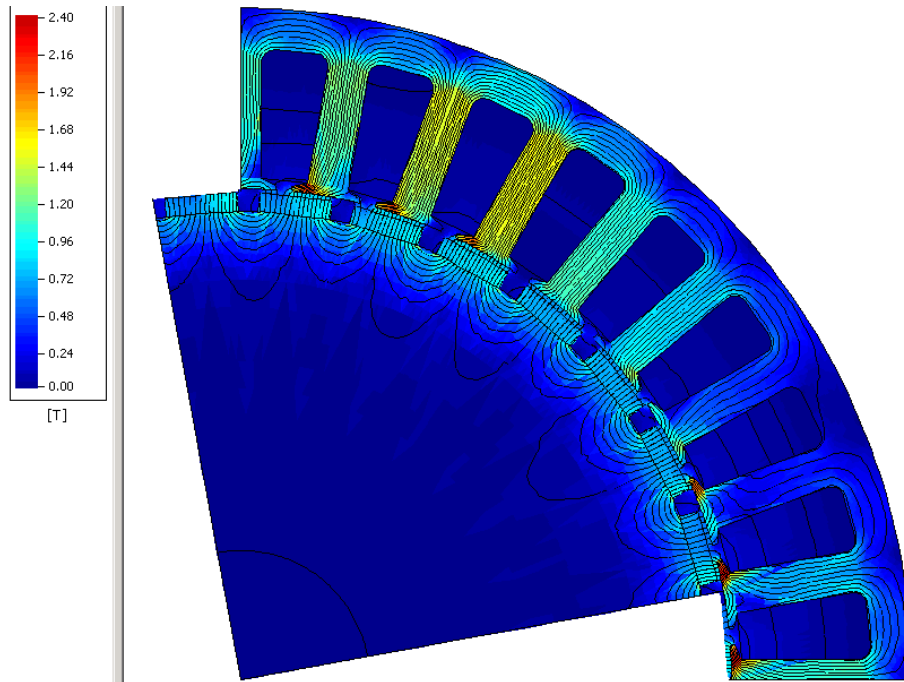
Yhtenä vaihtoehtona oli myös tutkia koneen käämityksen suunnittelua täysin väärälle napaluvulle. Eli kun roottori on 32-napainen, simuloitiin kone esimerkiksi käämityksellä, jonka suunnitteluparametrit olivat 36 napaa ja 36 uraa. Näillä väärän käämityksen ratkaisuilla hyötysuhde oli teoriassa itseasiassa korkeampi kuin oikealla käämityksellä, mutta ongelmaksi tuli hampaiden ja staattoriselän raudan voimakas kyllästyminen. Tällöin staattorin hampaita oli levennettävä ja madallettava, jolloin hyötysuhde laski ja nämä muutokset mitätöivät saavutetut edut.

Loppujen lopuksi hyötysuhdetta saatiin nostettua 6,6 % Adeptin mukaan, jolloin kokonaishyötysuhde muutoksien jälkeen on 86,0 %. Lasku suoritettiin generaattorina. Yleensä sähkökoneiden hyötysuhteet ovat korkeampia, mutta tällä pyörimisnopeudella, ura- ja napaluvulla ei päästä sen parempiin tuloksiin. Teoriassa hyötysuhdetta olisi vielä voinut nostaa noin 2 %, mutta tällöin koneen toiminta olisi käynyt riskialttiiksi, eikä se näin ollen ollut järkevää.

4.4 Prototyypin B staattori

Kuvassa 4.4 on esitetty Adeptilla tehty leikkauskuva prototyypistä B. Jos tätä kuvaa vertaa prototyypin A kuvaan 4.2, huomataan, että ura on nyt syvempi ja hieman leveämpi. Ura on myös prototyypillä B hieman avonaisempi kuin prototyypillä A, jossa se oli 3,4 mm auki ja nyt 4 mm. Käämitys on nyt helpompi toteuttaa kun ura on hieman avonaisempi ja samalla saadaan hyötysuhdetta nostettua. Hyötysuhteen nosto perustuu siihen, että staattorirautaa on vähemmän, jolloin rautahäviöt ovat pienemmät. Staattoriselkä on nyt myös paljon prototyyppiä A ohuempi, jolloin magneettivuolle on vähemmän tilaa kulkea. Koeajossa nähdään sitten käytännössä, että hyppääkö magneettivuo staattoriselästä koneen runkoon vai pysyykö se ohuessa staattoriselässä. Hajavuota näyttäisi mallinnuskuvien perusteella esiintyvän enemmän uudessa

staattoriratkaisussa, koska magneettivuolle on vähemmän tilaa kulkea staattoriraudassa, jolloin se hyppää suuremmalla todennäköisyydellä sieltä pois.



Kuva 4.4. Kuvaleikkaus Adept-laskentaohjelmiston tuottamasta mallista, jossa näkyvät mustalla magneettivuoviivat, staattori, roottori sekä uran muoto. Magneettivuon tiheys on esitetty väreissä.

Prototyypin B generaattorin Adept-laskelma on esitetty liitteessä 3. Suurin ero prototyypin B laskelmassa prototyyppiin A verrattuna on kuparihäviöiden suuruus. prototyypillä A kuparihäviöt olivat 4,2 kW ja prototyypillä B vain 2,4 kW, jolloin vähennys on noin 43 % eli ero on todella merkittävä. Prototyypin B rautahäviöt ovat noin 27 % pienemmät kuin prototyypin A ja kokonaishäviöt prototyypillä B ovat noin 37 % pienemmät kuin prototyypillä A. Mekaaniset häviöt pysyivät laskennallisesti täysin samana, koska roottoria ja koneen runkokokoa ei muutettu. Häviöiden pienentyminen johtuu siitä, että käämikuparin lisäyksen ansiosta käämityksessä vaikuttava virrantiheys on prototyypissä B noin 38 % pienempi kuin prototyypissä A. Prototyypin A virrantiheys oli $4,46 \frac{A}{mm^2}$ ja prototyypin B vain $2,75 \frac{A}{mm^2}$.

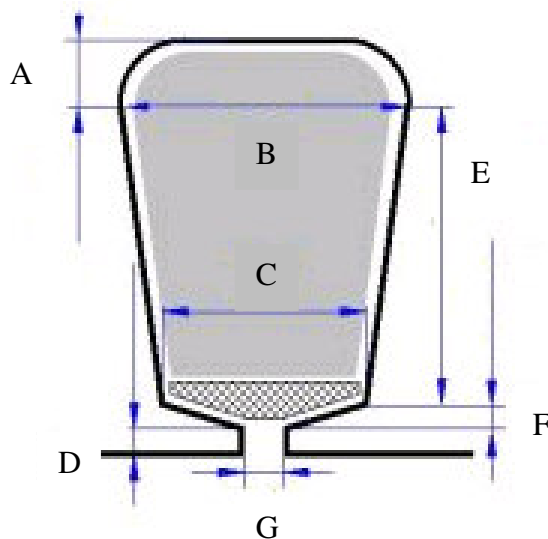
Prototyypillä B magneettivuon tiheys hampaan päässä on maksimissaan 2,3 T, mikä on sama kuin prototyypillä A. Magneettivuon tiheys hampaan juuressa on prototyypillä B maksimissaan 1,56 T ja prototyypillä A se oli hieman matalampi 1,46 T. Koska staattoriselkä on prototyypillä B ohuempi, on magneettivuon tiheys staattoriselässä noussut arvoon 1,0 T. Prototyypillä A tämäkin arvo oli alhaisempi eli 0,4 T. Prototyypillä B magneettivuon tiheydet ovat suurempia, koska staattorirautaa on vähennetty suurempien urien vuoksi.

Prototyypille B kokeiltiin myös monia eri käämitysratkaisuja, mutta niillä ei ollut juurikaan merkitystä hyötysuhteeseen. Lopulta päädyttiin käyttämään myös tässä

prototyypissä täysin samaa 32-napaista käämitystä kuin prototyypissä A. Tässä päätöksessä on vielä sekin etu, että edellisen prototyyppiprojektin jäljiltä on olemassa valmis käämityskaaviosuunnitelma, jota voidaan hyödyntää myös tässä projektissa. Prototyypin B käämitys sisältää vain enemmän kuparia kuin prototyypin A käämitys, mutta käämivyyhtien asennustapa uriin pysyy molemmissa prototyypeissä samana.

4.5 Uran mittojen optimointi Adeptin avulla

Kokeilemalla haettujen staattorin uramittojen lisäksi haluttiin tutkia, että millaisen staattorin uramuodon Adeptin Optimizer-toiminto laskee. Optimizer-toiminnoille valitaan tietyt muuttujat ja niille raja-arvot, joista se optimoi parhaat mahdolliset variaatiot. Optimointi pitää myös aina suorittaa tiettyjen sähkökoneen ominaisuuksien mukaan ja tässä tapauksessa staattorin uran kokoa optimoimalla pyrittiin löytämään mahdollisimman hyvä hyötysuhde. Optimoinnin jälkeen voidaan vertailla käsin kokeilemalla haettuja arvoja sekä Adeptin optimointiarvoja. Optimointia varten valittiin uralle 7 erilaista mittasuureta, jotka näkyvät kuvassa 4.5.



Kuva 4.5. Staattorin ura ja sen optimointia varten valitut mittasuureet.

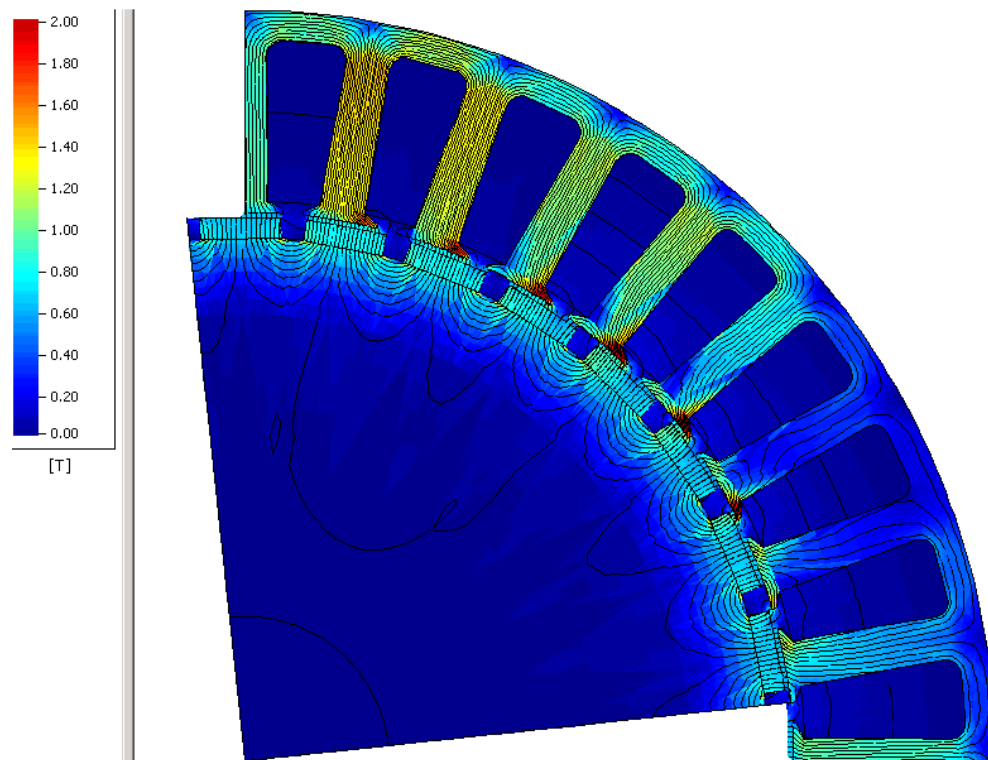
Adeptin optimoinnin jälkeen on saatu taulukossa 4.2 olevat tulokset, jossa kirjaimet vastaavat kuvassa 4.5 esitettyjä mittoja. Vertailun vuoksi taulukkoon on myös laitettu ne arvot, joiden perusteella prototyyppi B rakennettiin.

Taulukko 4.2. Adeptin optimoimat ja prototyypin B kokeilemalla haetut staattorin uran muodon mitat. Mittojen yksikkö on millimetri ja niiden selitykset löytyvät kuvasta 4.5.

	A	B	C	D	E	F	G
Adept-Optimizer	5,4	27,6	17,9	1,4	50,2	2,7	6,9
Prototyyppi B	5,0	26,0	18,0	2,0	45,0	2,0	4,0

Taulukon 4.2 arvoista nähdään, että suurin muutos Adeptilla optimoitujen ja prototyypin B arvojen välillä on mitta E, joka on uran syvyys. Adept myös ehdottaa hieman leveämpää uraa (mitta B), joka tarkoittaa juuresta kapeampaa staattorihammasta. Tällöin staattorihammas tulee luonnottoman muotoiseksi, koska se on juuresta kapea ja päästä leveä. Toinen merkittävä ero optimoitujen ja kokeilemalla haettujen arvojen välillä on mitta G, joka tarkoittaa uran auki olevaa osaa. Adept ehdottaa jopa 2,9 mm avonaisempaa uraa, joka parantaa hyötysuhdetta. Käytännössä ura ei voi olla näin avoin, koska käämintävaiheessa johdinkierrokset eivät pysy uran sisällä vaan nousevat sieltä pois. Liian avoin ura myös lisää ilmapälissä vaikuttavan magneettivuon yliaaltoja, joita Adept ei tässä optimoinnissa huomioinut ollenkaan.

Sähkökoneen toiminta simuloitiin Adeptin ehdottamilla arvoilla, ja Adeptin kuvaleikkaus simulointituloksesta on esitetty kuvassa 4.6.



Kuva 4.6. Kuvaleikkaus Adept Optimizerin tuottamasta mallista, jossa näkyvät mustalla magneettivuoviivat, staattori, roottori sekä uran muoto. Magneettivuon tiheys on esitetty väreissä.

Kuvan 4.6 staattoriratkaisulla generaattorina simuloituna hyötysuhteeksi saatiin 87,6 %, joka on noin 1,6 % parempi kuin prototyypillä B. Suurin ero näillä staattorimalleilla on siis staattoriselässä, joka Adeptin optimiarvoilla on erittäin ohut. Näin ohut staattoriselkä tuo ongelmia staattorin rakentamisvaiheessa, koska ohuita levyjä on vaikea käsitellä. Myös staattorin asentaminen runkoon on erittäin haasteellista jopa lämpösovitetta käytettäessä, koska näin ohut staattoriselkä muuttaa jo pienestäkin kolhusta muotoaan. Näin ohuella staattoriselällä on vielä prototyyppiä B suurempi riski siinä, että konetta kuormitettaessa magneettivuo hyppää staattoriselästä runkoon.

Lisäksi staattorihammas on nyt luonnottoman muotoinen, koska se on juuresta kapeampi kuin kärjestä.

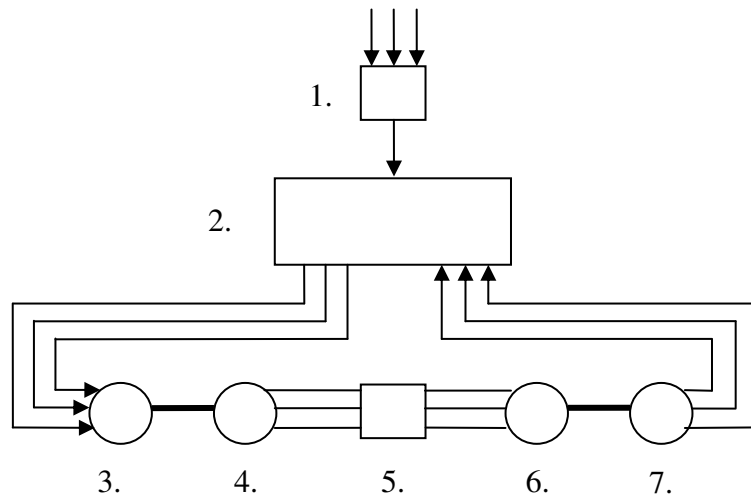
Kun arvoja haettiin käsin kokeilemalla, havaittiin, että hyötysuhde nousee entisestään jos staattoriselkää ohentaa lisää ja hammasta kaventaa juuresta. Eli toisin sanoen tekee juuri niin, mitä Adept ehdottaa. Hammas tehtiin kuitenkin suoraksi joka kohdasta ja staattoriselkä vahvemerkiksi magneettivuon karkaamisriskin vuoksi. Näiden seikkojen vuoksi hyötysuhde on teoriassa prototyypin B koneessa hieman matalampi, koska koneen suunnittelussa haluttiin pysyä varman toiminnan alueella ja riskejä ei haluttu ottaa. Prototyyppi päätettiin siis rakentaa prototyypin B mittojen mukaan.

5 MURTOVAKOKÄÄMITTYJEN PROTOTYYPPIGENERAATTOREIDEN KOEAJO

Laskennallisten tulosten lisäksi tulee prototyypikoneelle suorittaa aina koeajo, jotta sen todellinen toiminta saadaan selville. Koestamalla nähdään sähkökoneen sähköisten ominaisuuksien lisäksi myös mekaaninen toiminta. Myös rungon ja kääminpäiden lämpenemä saadaan koeajossa tarkasti selville. Koeajossa testataan ensin prototyyppi A, sen jälkeen sähkökone puretaan, vaihdetaan staattori ja taas kootaan osat yhteen. Tämän jälkeen suoritetaan koeajo prototyypillä B, jossa on vain erilainen staattori prototyyppiin A nähden.

5.1 Koeajon järjestelyt

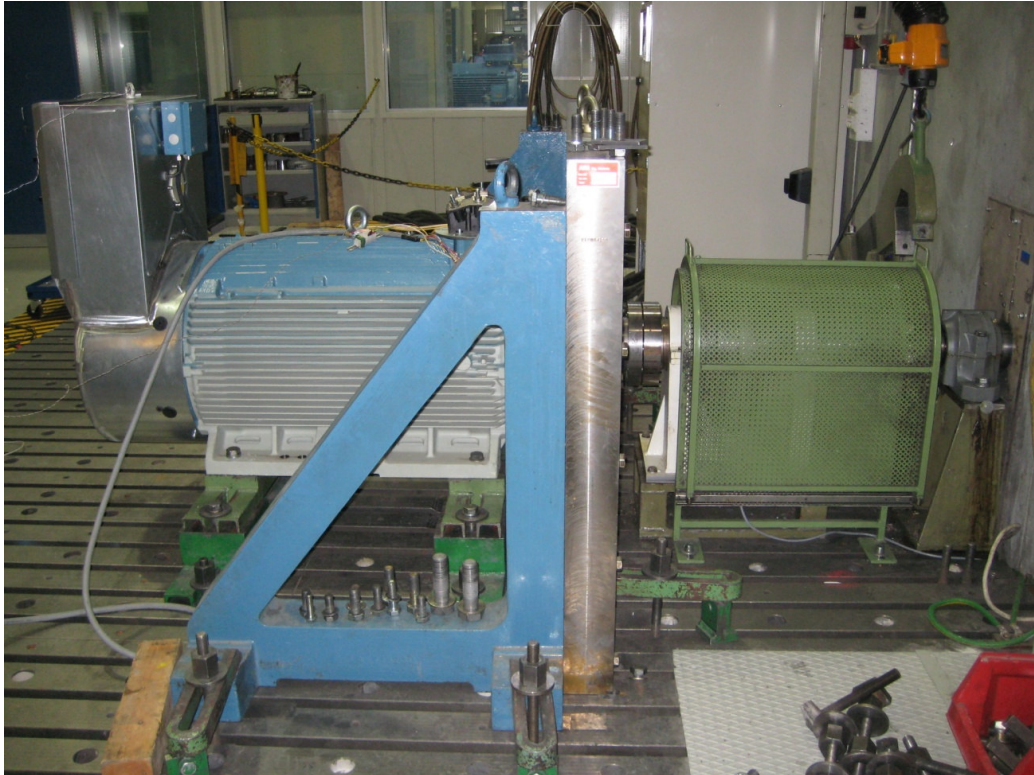
Kuvassa 5.1 on esitetty lohkokaaviokuva koestusjärjestelmästä. Koestusjärjestelmä toimii niin, että sähköverkosta otetaan tehoa järjestelmään vain laitteiden häviöiden verran. Ensimmäisenä järjestelmässä on tasasuuntaaja (numero 1), joka tasasuuntaa verkosta otettavan 3-vaihesähköä. Tämä tasasähkö syötetään taajuusmuuttajan (numero 2) välipiiriin. Välipiirin jälkeen sähkö vaihtosuunnataan ja syötetään asynkronimoottorille (numero 3), jonka kanssa on samalle mekaaniselle akselille kytketty tahtigeneraattori (numero 4), jonka tarkoitus on tuottaa koeajettavalle sähkökoneelle mahdollisimman puhdasta sinimuotoista sähköä, jossa ei ole sähköverkon häiriöitä mukana. Generaattorin tuottama sähkö syötetään taajuusmuuttajalle (numero 5), joka ohjaa koeajettavaa sähkökonetta (numero 6). Ennen tätä taajuusmuuttajaa mitataan mittamuuntajien avulla jännite ja virta, joista voidaan laskea syötettävä teho. Taajuusmuuttajan jälkeen otetaan jännitteen- ja virran käyrämuodot talteen, joista lasketaan myös teho. Sähkökoneen tyypistä riippuen se ajetaan tässä testausjärjestelmässä moottorina. Moottorin kuormana käytetään asynkronigeneraattoria (numero 7) ja näiden koneiden yhteisenä akselina pyörii momenttivarssi, jonka avulla mitataan momentti, pyörimisnopeus ja antoteho. Asynkronigeneraattorilta tuleva 3-vaihesähkö syötetään takaisin taajuusmuuttajalle (numero 2), jonka välipiiriin se taas tasasuunnataan. Tämä tasasähkö vaihtosuunnataan ja syötetään uudestaan moottorille, jota on merkitty numerolla 3.



Kuva 5.1. Lohkokaaviokuva ABB:n sähkökoneiden koestusjärjestelmästä. Komponentti 1 on tasasuuntaaja, 2 ja 5 esittävät taajuusmuuttajaa, 3 ja 6 moottoria sekä 4 ja 7 generaattoria. Koestettava sähkökone on merkitty kaavioon numerolla 6.

Kuvan 5.1 koestettavaa moottoria jarruttaa asynkronigeneraattori (numero 7), jonka jarruttava vaikutus perustuu negatiiviseen jättämään. Asynkronigeneraattori saa aluksi oman pyörimisnopeusohjeensa taajuusmuuttajalta (numero 2), kunnes koestettava moottori alkaa pyörittää asynkronigeneraattorin roottoria sen ohjauspyörimisnopeutta suuremmalla nopeudella, jolloin asynkronigeneraattorin staattorikenttä alkaa myös pyöriä roottorin synnyttämän kentän ansiosta nopeammin. Kun generaattorin staattorikenttä pyörii nyt todellista ohjearvoa nopeammin, pyrkii se jatkuvasti hakeutumaan takaisin hitaampaan ohjearvoon, jolloin syntyy generaattorin pyörimisnopeutta hidastava vaikutus. Tätä periaatetta käyttäen saadaan tehokas ja pitkäikäinen jarru, koska mitään mekaanista kitkaan perustuvaa hankausjarrua ei ole.

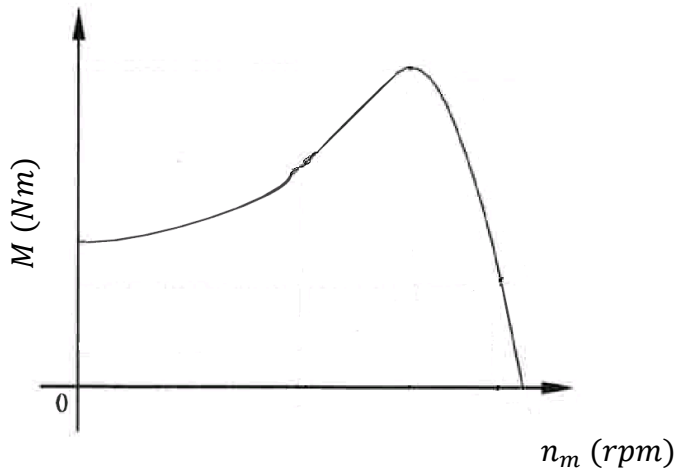
Kuvassa 5.2 on kuva koestettavasta moottorista ja vihreän kotelon alla on suojassa momenttivarssi, joka yhdistää koestettavan moottorin ja seinän takana kuormana olevan generaattorin. Momenttivarren avulla voidaan mitata tarkasti koestettavan moottorin tuottama momentti, antoteho ja pyörimisnopeus. Tässä tapauksessa kun pyörimisnopeus on vain 65 rpm ja momentti noin 3000 Nm, ei kippimomenttia pystytä helposti mittaamaan. Yleinen sähkömoottorin kippimomenttikäyrä on esitetty kuvassa 5.3. Kippitilanteessa moottorin kuormitus on niin suuri, että moottori ei kykene enää tuottamaan riittävää momenttia, jolloin tuotettava momentti romahtaa kun roottori ei kykene enää seuraamaan staattorikenttää.



Kuva 5.2. Prototyypikone testauspenkissä. Prototyypikoneen vasemmassa päässä on erillispuhallin alumiinikotelossa, joka puhaltaa sähkökoneen pinnasta nousevan lämmön pois. Oikealla vihreän suojuksen alla on momenttivarsi, jolla mitataan sähkökoneen momentti, antoteho ja pyörimisnopeus. Oikealla puolella kuvassa näkyvän seinän toisella puolella on jarruna toimiva generaattori.

Molempien prototyyppien tapauksessa näin hitaalla pyörimisnopeudella momenttivarsi alkaa värähtelemään kippitilanteessa kun moottori yrittää väkisin pyörittää sitä. Nämä nopeat värähtelyvoimat ovat liikaa momenttivarren kestävyydelle, jolloin siihen tulee murtumia. Toinen keino kippimomentin määrittämiseen olisi, että staattorikäämit kytketään oikosulkuun ja yritetään väkisin pyörittää roottoria ulkoisella voimakoneella. Tämäkään keino ei kuitenkaan nyt tule kyseeseen, koska momenttivarten kohdistuvat värähtelyvoimat pysyvät edelleen samoina. Momenttivarsi on lisäksi erittäin kallis komponentti, joten näissä mittauksissa kippimomentin mittauksen ei todettu olevan komponenttirikon mahdollisuuden vuoksi järkevää.

Molemmille prototyypeille suoritettiin myös indusoituneen jännitteen mittaus. Mittausjärjestely toteutettiin niin, että kuvan 5.1 sähkökone numero 7 toimi moottorina ja koestettava prototyyppi (numero 6) generaattorina. Prototyypin indusoima jännite mitattiin suoraan sen navoista ja tallennettiin oskilloskooppiin. Myös kuormalla ajettaessa mittausdata otettiin talteen oskilloskoopin avulla.



Kuva 5.3. Sähkömoottorin momentin käyttäytyminen kierrosnopeuden funktiona. Momentin huippuarvon jälkeen se alkaa laskea nopeasti, jolloin tapahtuu niin sanottu sähkömoottorin kippaus kun roottori ei enää kykene seuraamaan staattorikenttää (Aura & Tonteri 1994, s. 323).

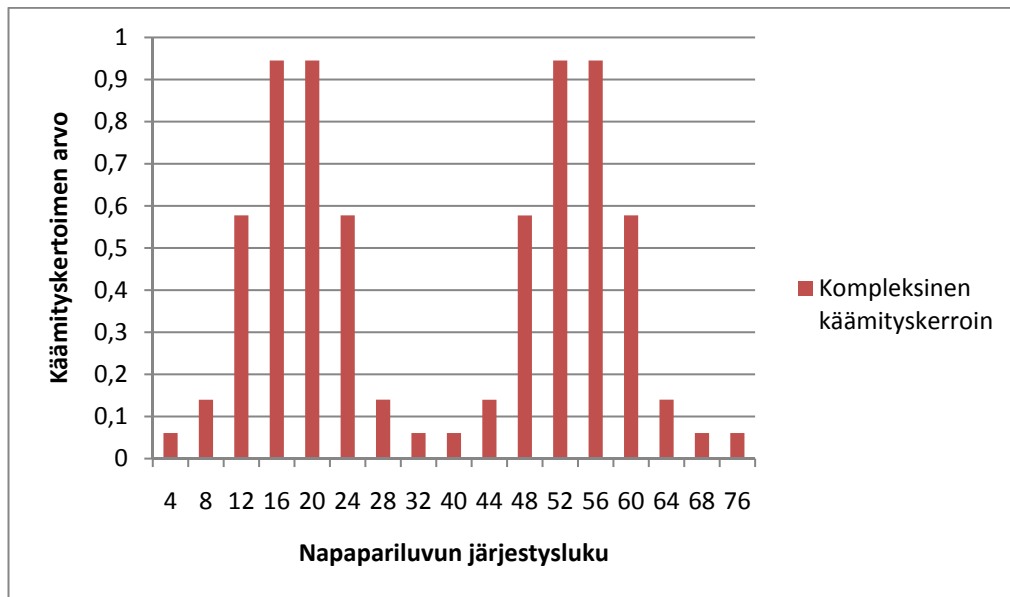
Ympäristön ja koeajettavan prototyypin lämpötilaa seurattiin jatkuvasti sekä rungon pinnasta, että jokaisen vaiheen käämivyyhtien päistä. Antureina käytettiin Pt100-vastusantureita. Lämpenemä käämivyyhdissä koneen sisällä voidaan päätellä käämin päiden lämpötilojen avulla kun suoritetaan erillinen resistanssimittaus IEC-60034 standardin mukaisesti. Ennen tätä mittausta sähkökone ajetaan kuumaksi, jolloin käämin päiden lämpötilan nousunopeus on asetunut standardin mukaisesti alle 2 °C tunnissa. Käytännössä kuitenkin odotetaan pidempään, jolloin lämpötilan nousunopeus on enää noin 0,5 °C tunnissa. Tämän jälkeen sähkökone pysäytetään ja aloitetaan resistanssin mittaus yhden vaiheen navoista. Mittauksen pitää alkaa tämän kokoluokan sähkökoneessa viimeistään 30 s kuluttua pysäytyksestä, koska käämin lämpötila laskee nopeasti. Resistanssin arvot tallennetaan pysäytyksestä alkaen 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180 ja 210 sekunnin välein. Resistanssi laskee koko ajan ensimmäisestä mittauksesta kohti viimeistä mittausta, koska resistanssi on lämpötilasta riippuvainen. Käämivyyhdin loppulämpötila voidaan ratkaista seuraavasta yhtälöstä

$$T_2 = \frac{R_2}{R_1} (T_1 + k) - k , \quad (26)$$

missä T_1 on käämivyyhdin lämpötila kylmänä eli ennen koeajon aloitusta, T_2 on käämivyyhdin lämpötila koeajon lopussa, R_1 on käämivyyhdin resistanssi lämpötilassa T_1 , R_2 on käämivyyhdin resistanssi lämpimänä koeajon lopussa ja k on lämpötilavakio käämimateriaalille (kuparille 235 ja alumiinille 225). Tästä mittauksesta saadaan laskettua käämityksen jäähtymiskuvaaja. Jos kuvaaja ei ole lineaarisesti laskeva suora, on käämityksessä silloin jotain vikaa. (IEC-60034-1, s. 79.)

Kuvassa 5.5 on esitetty molemmissa prototyypeissä käytetyn 32-napaisen murtovakokäämityksen kompleksiset käämityskertoimet. Ne on saatu käyttämällä

ABB:n omaa murtovakokäämityksen suunnitteluohjelmaa, joka suunnittelee lähtötietojen (uraluku, napapariluku ja vyyhdenleveys) perusteella murtovakokäämityksen ja laskee sille kompleksiset käämityskertoimet.



Kuva 5.4. Molemmissa prototyypeissä käytetyn 32-napaisen murtovakokäämityksen tuottamat kompleksiset käämityskertoimet. Kompleksisissa käämityskertoimissa sama jaksollisuus toistuu järjestysluvun 36 välein, joka vastaa sähkökoneen uralukua.

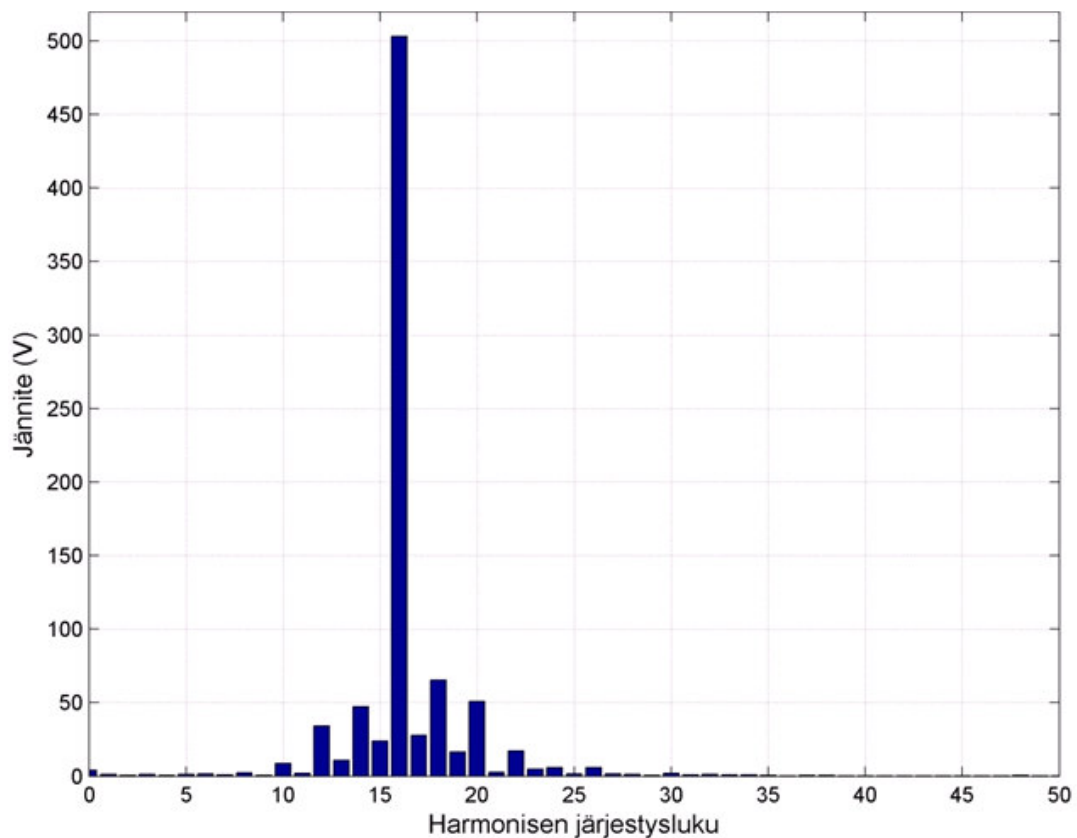
Kuvassa 5.4 on havaittavissa tietty jaksollisuus, joka toistuu järjestysluvun 36 välein. Tämä jaksollisuus johtuu sähkökoneen uraluvusta, joka on 36. Perusaaltona vaikuttaa napaparilukua 16 vastaava käämityskertoimen arvo, koska koneella on 32 napaa. Sitä suuremmat järjestysluvut synnyttävät koeajoissa todennäköisesti yliharmonisia aaltoja ja pienemmät vastaavasti aliharmonisia.

5.2 Prototyypin A koeajo

Prototyyppi A käyttäytyi koeajoissa odotusten mukaisesti ja koeajoissa laskettu hyötysuhde oli vielä laskettua arvoa parempi. Adept laski moottorina ajettavalle koneelle nimellistoimintapisteessä hyötysuhteeksi 76,2 % kun puolestaan koekentällä vastaavaksi arvoksi saatiin 79,2 %. Tätä arvojen eroavaisuutta on tutkittu enemmän tämän työn kappaleessa 6. Tulokset ja niiden tarkastelu.

Hyötysuhde oli koeajon alussa 83,9 %, josta se alkoi tasaantua edellä mainittuun arvoon. Hyötysuhteen laskeminen voidaan selittää sillä, että kone oli koeajon alussa kylmä ja häviöt siten pienempiä. Koneen lämmitessä laakerien kitkahäviöt ja resistanssihäviöt kasvavat. Koneella kesti noin 7,5 tuntia lämmetä loppulämpötilaan, jolloin lämpötilan nousu oli enää 0,5 °C tunnissa. Tällöin voitiin suorittaa käämityksen resistanssimittaus, jonka tuloksista voitiin piirtää jäähtymiskuvaaja. Käämin päiden lämpötila koeajon lopussa oli 103 °C.

Kuvassa 5.5 on esitetty prototyypin A indusoituneen pääjännitteen harmonisten komponenttien tehollisarvot. Kuvaajan spektri on laskettu 16 aallon sarjasta, koska koneen tuottama jännite oli jaksollista 16 aallon välein napapari-luvusta 16 johtuen. Tällöin voidaan myös tutkia indusoituneessa jännitteessä esiintyviä aliharmonisia aaltoja, jotka eivät olisi näkyneet ollenkaan yhdestä aallosta tehdyllä yliaaltoanalyysillä. Tässä tapauksessa siis 16. aalto on perusaalto, sitä korkeammat aallot ovat yliharmonisia ja alemmat aliharmonisia. Yliaaltoanalyysi on tehty käyttäen apuna Matlab-ohjelmistoa, johon oskilloskoopilla talteen otettu mittaustiedosto on tuotu. Tämän jälkeen mittaustuloksista on valittu 16 aallon sarja, jolle on suoritettu FFT-analyysi. Matlabin harmonisten laskentatiedoston sisältö on esitetty kommentoituna liitteessä 4 ja molempien prototyyppien harmoniset sekä indusoituvalla jännitteellä että kuormavirralla on laskettu samalla tavalla, jolloin niitä voidaan verrata keskenään.

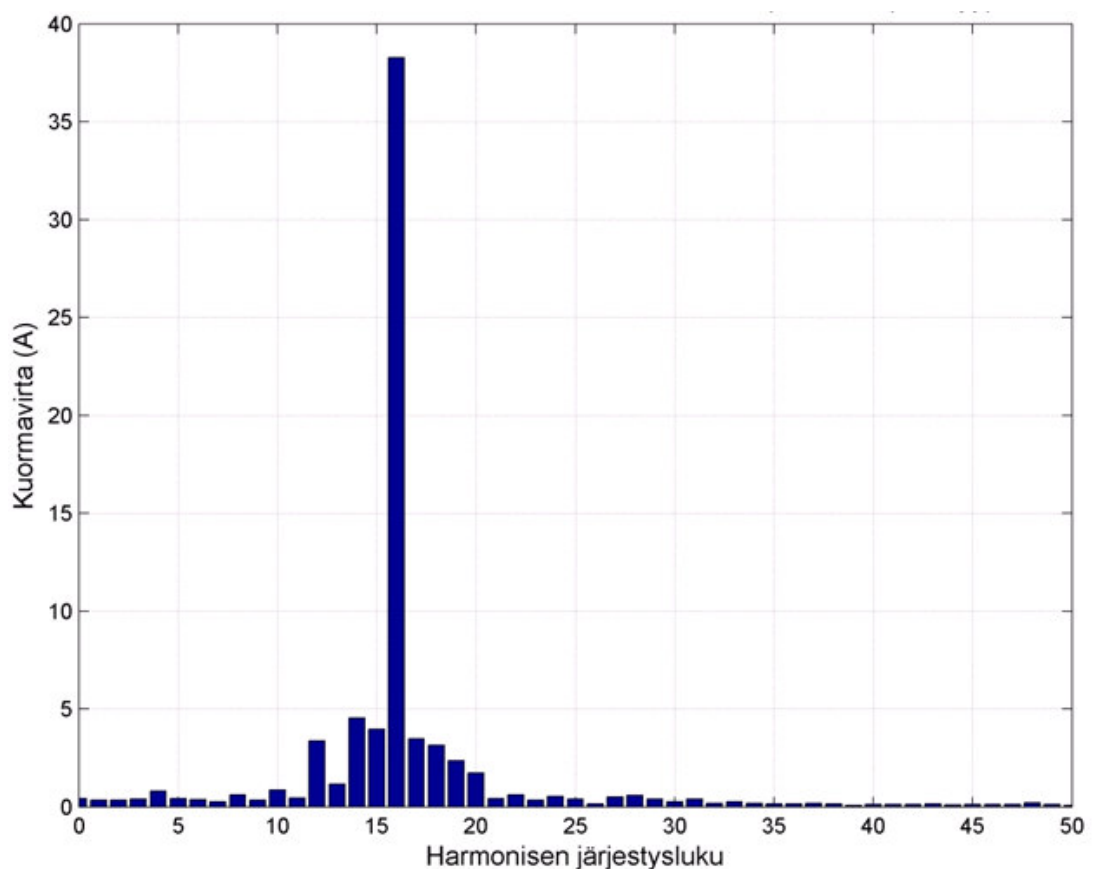


Kuva 5.5. Prototyypin A indusoituneen pääjännitteen harmonisten komponenttien tehollisarvot. Harmoniset on laskettu 16 aallon sarjasta, jolloin myös käämityksen synnyttämät aliharmoniset aallot näkyvät.

Murtovakokäämityksen tuottamat harmoniset ovat yleensä aikayliaaltoja, mutta ne voivat olla myös tilayliaaltoja, jotka näkyvät korkeampina napalukuina ja taajuuksina koneen toiminnassa. Kuvassa 5.5 on hyvin näkyvissä myös murtovakokäämitykselle ominaiset aliharmoniset aallot, jotka aiheuttavat häiriötä koneen toimintaan. Aliharmoniset aallot johtuvat siitä, että murtovakokäämitys ei ole magneettisesti symmetrinen, koska osa navoista on erilaisia. Tätä ongelmaa ei kokovakokäämityksellä

esiinny, koska se on magneettisesti symmetrinen ja kaikki navat ovat samanlaisia. Kuvasta 5.5 voidaan havaita, että harmonisten amplitudeilla on tiettyjä yhtäläisyyksiä kuvan 5.4 kompleksisten käämityskertoimien kanssa. Indusoituneessa jännitteessä perusaallon lisäksi erityisesti järjestyslukujen 12 ja 20 harmoniset ovat suurempia, kuten kuva 5.4 antoi odottaa. Muita suuria harmonisia ovat 14. ja 18. aalto.

Kuvassa 5.6 on esitetty prototyypin A yhden vaiheen kuormavirran harmonisten komponenttien tehollisarvot, jotka on laskettu keskiarvona 16 aallon sarjasta. Selvästi suurin aalto on perusaalto, joka on järjestysluvultaan 16, mutta myös aalto 12 nousee aliharmonisten aaltojen joukosta selvästi esiin, joka oli odotettavissa kuvan 5.4 mukaan. Yliaaltoja on analysoitu tarkemmin tämän työn kappaleessa 6. Tulokset ja niiden tarkastelu.



Kuva 5.6. Prototyypin A yhden vaiheen kuormavirran harmonisten komponenttien tehollisarvot kun konetta ajetaan nimellistoimintapisteessä. Harmoniset on laskettu 16 aallon sarjasta, jolloin myös käämityksen synnyttämät aliharmoniset aallot näkyvät.

Prototyyppi ajettiin kolmessa toimintapisteessä, jotka olivat nimellispiste (20 kW, 65 rpm, 17,3 Hz), alikuorma (18 kW, 65 rpm, 17,3 Hz) ja ylikuorma (22 kW, 65 rpm, 17,3 Hz). Yliaaltomittaus tehtiin vain indusoituneille jännitteille sekä nimellistoimintapisteessä, resistanssimittaus vain nimellistoimintapisteessä ja hyötysuhdemittaus jokaisessa toimintapisteessä. Ylikuormalla koneen hyötysuhde ei oleellisesti alentunut, sillä se oli 78,7 %. Alikuormalla hyötysuhde puolestaan nousi

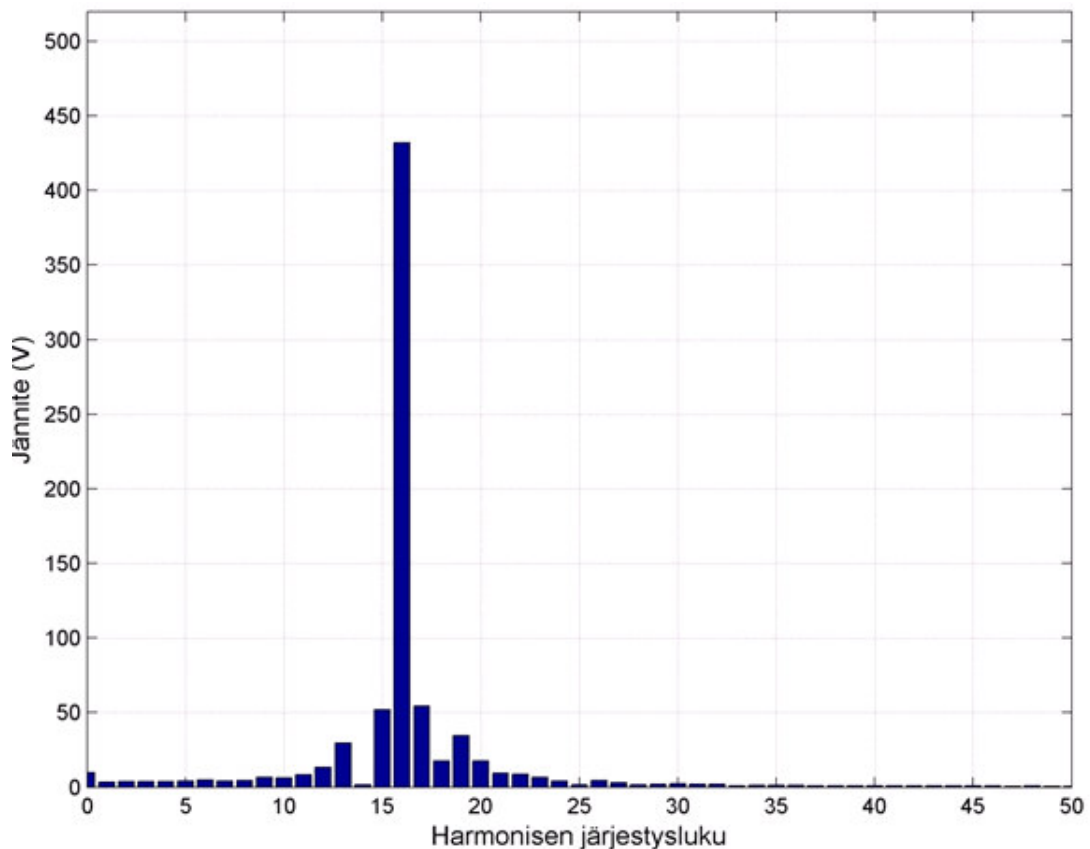
merkittävästi, sillä sille mitattiin arvo 83,1 %, joka on noin 3,9 % nimellistoimintapisteen hyötysuhdetta parempi.

5.3 Prototyypin B koeajo

Prototyypillä B suoritettavat koeajot sujuivat myös odotetun mukaisesti ja sähkökone osoittautui hyötysuhteeltaan huomattavasti paremmaksi kuin oli etukäteen laskettu. Adeptin laskema hyötysuhde nimellistoimintapisteessä ajettavalle moottorille oli 86,3 %, mutta koekentällä mitattu hyötysuhde oli 91,5 %, joka on 5,2 % laskennallista arvoa parempi. Tätä eroa on selitetty tarkemmin kappaleessa 6. Tulokset ja niiden tarkastelu.

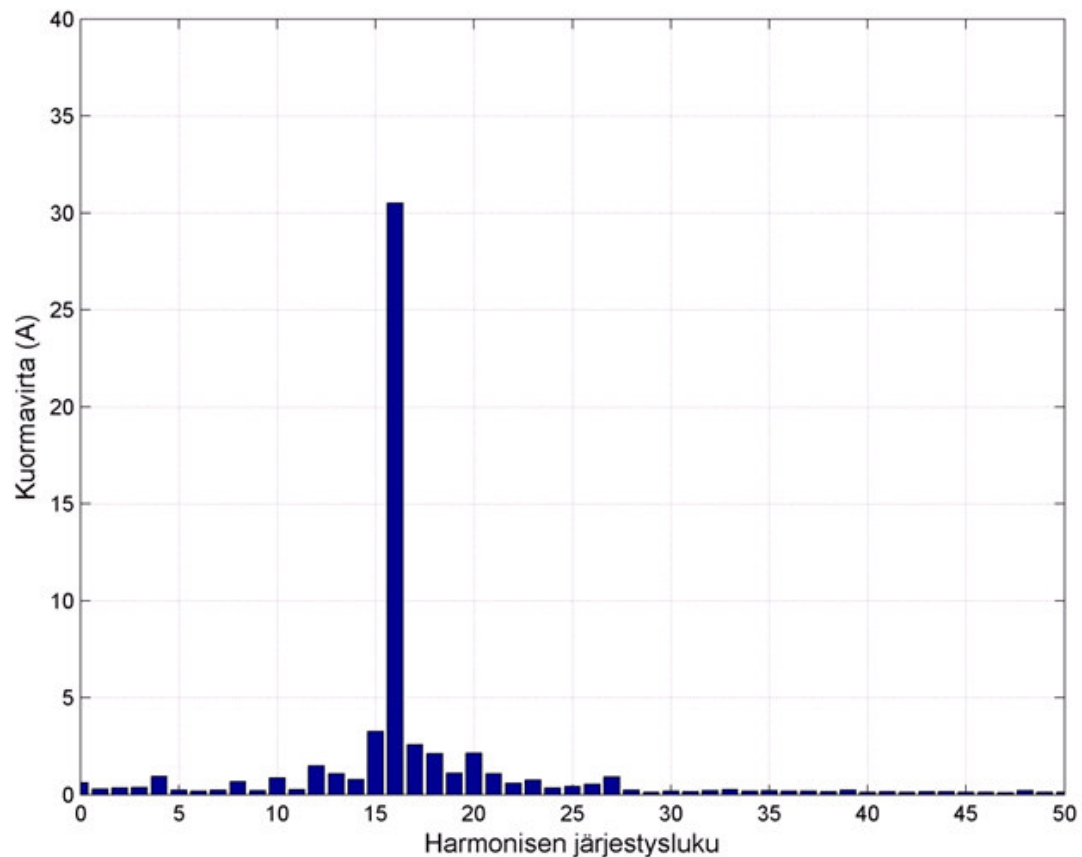
Mittauksen alussa koneen hyötysuhde oli 91,6 % ja se pysyi koko koeajon lähes samana. Kuormalla ajettaessa käämin päiden lämpötila nousi loppulämpötilaan 55 °C, joka on todella alhainen verrattuna prototyyppiin A. Koneen lämpötila tasaantui noin 6:ssa tunnissa vakioksi kun käytettiin samaa erillispuhallinta kuin prototyypin A kanssa.

Kuvassa 5.7 on esitetty indusoituneen pääjännitteen harmonisten komponenttien tehollisarvot, jotka on laskettu prototyypin A tapaan 16 aallon sarjasta, jolloin aliharmoniset aallot saadaan myös esiin. Kuvasta nähdään, että voimakkaimmin vaikuttavat 12., 15., 16. ja 19. harmoninen. 12. harmonisen olemassolo perustuu osittain kuvan 5.4 kompleksisen käämityskertimen suureen vaikutukseen ja 16. harmoninen on perusaalto, jolle sähkökoneen toiminta on suunniteltu.



Kuva 5.7. Prototyypin B indusoituneen pääjännitteen harmonisten komponenttien tehollisarvot. Harmoniset on laskettu 16 aallon sarjasta, jolloin myös käämityksen synnyttämät aliharmoniset aallot näkyvät.

Kuvassa 5.8 on esitetty prototyypin B yhden vaiheen kuormavirran harmonisten komponenttien tehollisarvot kun sähkökonetta ajettiin nimellistoimintapisteessä. Harmoniset on laskettu 16 aallon sarjasta, jolloin myös aliharmoniset aallot näkyvät. Spektrissä näkyy selvästi kuvan 5.4 kompleksisten käämityskertoimien vaikutus, koska 4., 8., 12., 16. ja 20. aalto nousevat esiin, vaikka viereiset aallot molemmilla puolilla ovat pienempiä. 16. aalto on siis perusaalto, jolla konetta ajetaan ja jolle koneen toiminta on suunniteltu.



Kuva 5.8. Prototyypin B yhden vaiheen kuormavirran harmonisten komponenttien tehollisarvot kun konetta ajetaan nimellistoimintapisteessä. Harmoniset on laskettu 16 aallon sarjasta, jolloin myös käämituksen synnyttämät aliharmoniset aallot näkyvät.

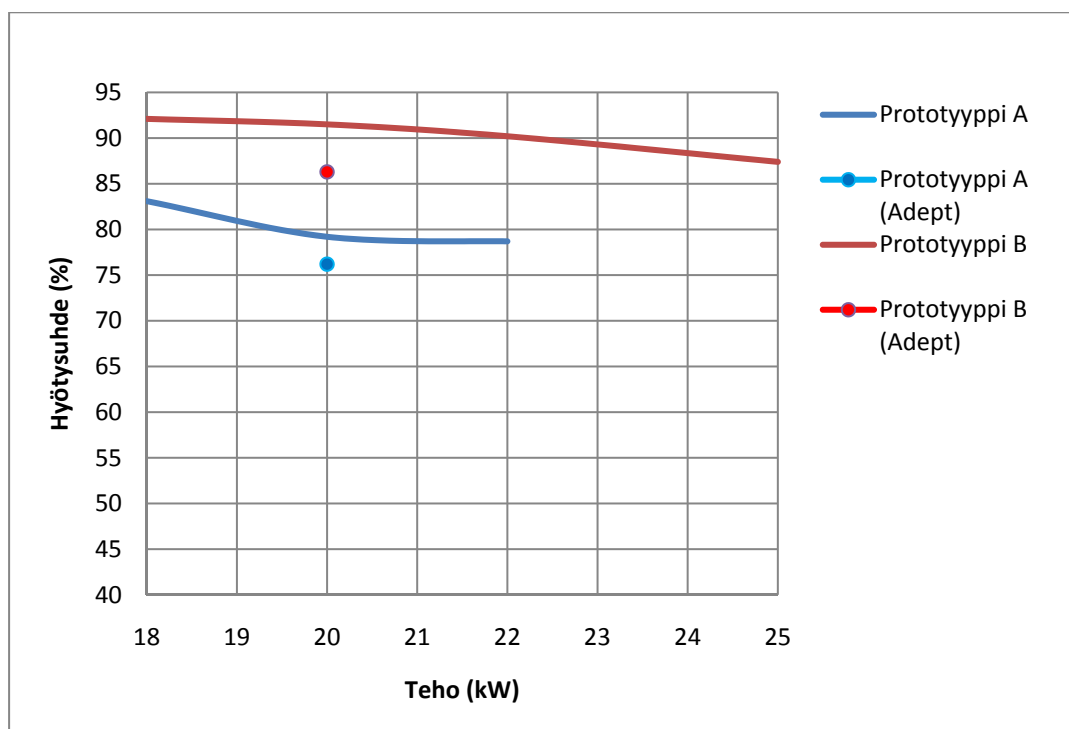
Prototyyppi B ajettiin neljässä toimintapisteessä, vaikka prototyyppi A ajettiin vain kolmessa. Syy tähän oli se, että prototyyppi B voitiin ajaa vielä suuremmalla ylikuormalla kuin oli etukäteen suunniteltu, koska koneen käyntilämpötila oli erittäin alhainen. Kone ajettiin nimellistoimintapisteessä (20 kW, 65 rpm, 17,3 Hz), alikuormalla (18 kW, 65 rpm, 17,3 Hz), ylikuormalla (22 kW, 65 rpm, 17,3 Hz) ja vielä suuremmalla ylikuormalla (25 kW, 65 rpm, 17,3 Hz). Yliaaltomittaus tehtiin vain indusoituneille jännitteille ja nimellistoimintapisteelle, resistanssimittaus nimellistoimintapisteelle sekä ylikuormalle 25 kW ja hyötysuhdemittaus jokaiselle toimintapisteelle. 25 kW ylikuormalla koneen käämin päiden lämpötila nousi arvoon 79 °C ja hyötysuhde laski

arvoon 87,4 %, jolloin tätä konetta voisi lämpötilan puolesta ehkä kuormittaa vielä jopa 30 kW teholla. 22 kW ylikuormalla koneen hyötysuhde laski arvoon 90,2 % ja alikuormalla hyötysuhde nousi arvoon 92,1 %, joka on 0,6 % nimellispisteen hyötysuhdetta parempi.

6 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Prototyyppi B osoittautui erittäin hyvin toimivaksi sähkökoneeksi, joka toimii paljon paremmalla hyötysuhteella kuin prototyyppi A. Prototyyppi B:n erittäin alhainen käyntilämpötila oli yllätys, jonka johdosta sitä voitiin kuormittaa huomattavasti enemmän, mitä oli etukäteen suunniteltu. Kone on suunniteltu 20 kW nimellisteholle erillispuhaltimen kanssa, mutta testien perusteella sitä voitaisiin todennäköisesti käyttää nimellisteholla jopa ilman erillispuhallinta tai erillispuhaltimen kanssa jopa 30 kW teholla. Loppulämpötilassa koeajon päättyessä prototyypin A käämivyyhtien päät olivat lämpötilassa 103 °C. Prototyypillä B vastaava arvo oli vain 55 °C. Prototyypin B käämivyyhtien päät olivat siis 48 °C viileämmät kuin prototyypillä A.

Kuvaan 6.1 on kerätty molempien prototyyppien hyötysuhteet koeajoissa mitatuissa pisteissä sekä nimellistoimintapisteessä Adeptilla lasketut teoreettiset hyötysuhteet. Hyötysuhteet on mitattu koekentällä kuormalla ajettaessa nimellistoimintapisteessä sekä yli- ja alikuormalla. Prototyypillä B oli nimellispisteessä ajettuna 12,3 %, alikuormalla 9 % ja ylikuormalla 11.5 % parempi hyötysuhde kuin prototyypillä A. Prototyypiltä A puuttuu mittauspiste 25 kW:in kohdalta, koska konetta ei voitu kuormittaa niin suurella teholla liiallisen lämpenemän vuoksi.



Kuva 6.1. Prototyyppien A ja B hyötysuhteet koeajoissa mitatuissa pisteissä sekä Adeptilla lasketut teoreettiset hyötysuhteet nimellistoimintapisteessä.

Kuten kuvan 6.1 arvoista huomataan, arvioi Adept hyötysuhteet nimellistoimintapisteessä ajettaessa hieman alakanttiin. Yksi syy arvojen eroavaisuuteen on, että Adeptilla ei osattu etukäteen arvioida koneen lämpökäyttäytymistä täysin tarkasti. Sen takia ero Adeptilla lasketun arvon ja koekentällä mitatun arvon välillä on suurempi prototyypillä B, koska se kävi huomattavasti viileämpänä kuin oli etukäteen osattu odottaa. Myös jokainen mittalaite aiheuttaa mittausvirhettä tulokseen. Esimerkiksi momenttiakselin anturilta tuleva mittaustieto muutetaan vahvistimella tehoanalyysoitavaksi. Jokaisella kolmella komponentilla on pieni mittausvirhe. Näissä koeajoissa käytetty momenttiakseli on tarkoitettu suuremmalle momentille ja nopeudelle, jolloin näin pienellä momentilla ja nopeudella ajettaessa mittausvirhe on myös suuri. Virta- ja jännitemuuntajat aiheuttavat myös suurehkon mittausvirheen, koska ne on leimattu 50:n ja 60 Hz:n taajuudelle ja nyt käytettävä taajuus oli vain 17,3 Hz. Taajuusmuuttaja aiheuttaa myös häiriötä mittalaitteille, jolloin mittaustulos vääristyy edelleen. Näissä koeajoissa painopiste oli kuitenkin verrata kahta prototyyppiä keskenään eikä syvällisesti perehtyä koekentän virhetarkasteluun.

Indusoituneiden jännitteiden harmonisten spektreissä (kuvat 5.5 ja 5.7) on selvästi havaittavissa, että prototyypin B tapauksessa perusaallon tehollisarvoinen indusoitunut pääjännite on noin 70 V pienempi kuin prototyypin A tapauksessa. Tämä eroavaisuus on selitettävissä sillä, että prototyypillä B sarjassa oleva käämikierrosten lukumäärä on pienempi kuin prototyypillä A, jolloin se myös näkyy prototyypin B pienempänä tyhjäkäyntijännitteenä.

Yliaaltospektreistä nähdään myös, että murtovakokäämitys tuottaa 3:lla jaollisia yliaaltoja sekä myös aliharmonisia, joita ei kokovakokäämityllä käämityksellä synny. Molempien prototyyppien indusoituneen jännitteen ja kuormavirran yliaaltospektreillä on jonkun verran yhtäläisyyttä kuvan 5.4 kompleksisten käämikertoimien kanssa, koska murtovakokäämitys synnyttää myös perusaaltoon nähden matalampien ja korkeampien napalukujen aaltoja. Osa kuvan 5.4 aalloista on suoraan luettavissa molempien prototyyppien yliaaltospektreistä, mutta osa kompleksisten käämikertoimien vaikutuksista ei näy mitenkään. Tämä vaihtelevuus johtuu siitä, että murtovakokäämitys suodattaa joitakin harmonisia, jolloin se voi myös kumota jonkun kompleksisen käämityskertoimen aallon vaikutuksen lähes nollassa.

Kun tutkitaan molempien prototyyppien indusoituneiden jännitteiden yliaaltoja keskenään, huomataan, että ainut yhtäläisyys spektrin muodossa on korkea 16. aalto, joka on perusaalto. Muiden aaltojen amplitudeissa ei juurikaan ole yhtäläisyyttä. Esimerkiksi prototyypillä A aliharmoniset 12 ja 14 sekä yliharmoniset 18 ja 20 ovat perusaallon lisäksi suuret, mutta prototyypillä B ne ovat pienet. Prototyypillä B perusaallon lisäksi aliharmoniset 13 ja 15 sekä yliharmoniset 17 ja 19 ovat suuret kun taas prototyypillä A ne ovat pienet. Indusoituneiden jännitteiden harmonisten vertailua ei voida pitää täysin luotettavana, koska mitattavaa sähkökonetta pyörittävä moottori aiheutti epätasaisen pyörimisnopeutensa ansiosta mittauksiin häiriötä. Tämä häiriö näkyi oskilloskoopin näytöllä selvästi kun indusoituvan jännitteen amplitudi vaihteli

jatkuvasti, jolloin täysin luotettavaa analyysiä näiden harmonisten keskinäisistä suuruuksista ei voida tehdä.

Molempien prototyyppien kuormavirran harmonisia vertailtaessa huomataan, että spektrin muoto prototyyppillä B on lähestulkoon sama kuin prototyyppillä A. Prototyyppillä B kuormavirta on pienempi kuin prototyyppillä A, jolloin myös kaikki harmonisetkin ovat prototyyppillä B pienempiä. Prototyyppillä B suurimpia kuormavirran harmonisia komponentteja perusaallon lisäksi ovat aliharmoninen 15 ja yliharmoniset 17, 18 ja 20 kun prototyyppillä A edellä mainittujen lisäksi suurimpia ovat vielä aliharmoniset 12 ja 14 sekä yliharmoninen 19. Tämä vaihtelu johtunee käämityksen ominaisuudesta suodattaa yliaaltoja, koska vaikka käämitys on napaluvultaan molemmissa prototyypeissä sama, on prototyypin B käämityksessä enemmän kuparia prototyypin A käämitykseen verrattuna. Tämän johdosta käämitykset eivät ole täysin samanlaiset ja niillä on erilainen kyky suodattaa yliaaltoja.

Sähkökoneen staattorin levymateriaalilla on myös vaikutusta hyötysuhteeseen. Jos pyörimisnopeus ja syöttötaajuus olisivat olleet suurempia, olisi hajavuota esiintynyt enemmän. Näin hitaalla konetyypillä hajavuon vaikutus on kuitenkin erittäin pieni, jolloin tässä tapauksessa staattorin levymateriaalilla ei ollut juurikaan merkitystä hyötysuhteeseen. Tässä tapauksessa käytettiin levyä M600-50A, koska paremman hyötysuhteen levy M400-50A olisi tuonut vain 0.1 % parannuksen hyötysuhteeseen. Tosin jos konetta ajetaan tulevaisuudessa nimellistehoa suuremmalla teholla, voi levymateriaalin vaihto vaikuttaa hyötysuhteeseen enemmän kuin nyt.

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, että miten hitaasti pyörivän sähkökoneen hyötysuhdetta voidaan nostaa. Kaikkein paras ratkaisu tähän on pyrkiä lisäämään staattoriin enemmän kuparia, jolloin käämityksessä kulkeva virta ja virrantiheys saadaan pienemmäksi. Tällöin resistiivisiä häviöitä on vähemmän ja sähkökone toimii viileämpänä sekä paremmalla hyötysuhteella. Kuparin lisäys tietysti lisää sähkökoneen kokonaiskustannuksia, mutta vähentää sen käyttökuluja, jolloin kuparin lisäys maksaa itsensä takaisin pidemmällä aikavälillä. Tällaisia suurta momenttia tuottavia hitaasti pyöriviä sähkökoneita voidaan käyttää esimerkiksi tuuligeneraattorina sekä paperikoneissa ja erilaisissa hitaissa kuljetinsovelluksissa.

7 YHTEENVETO

Fosssiilisten polttoaineiden vähentyessä on kiinnostus uusiutuviin energiamuotoihin kasvanut. Uusiutuvia energiamuotoja ovat vesivoima, aurinkoenergia, aaltoenergia ja tuulienergia. Tässä työssä on keskitytty tuulimyllyissä sähköä tuottavan komponentin eli generaattorin kehitykseen. Generaattori on tässä työssä hitaasti pyörivä, koska ideana oli kehittää sellainen generaattori, joka voidaan kytkeä suoraan tuuliturbiinissa lapojen kanssa samalle askelille ilman häviöitä ja huoltoa vaativaa vaihteistoa. Ajan trendinä on myös kehittää koneiden ja laitteiden hyötysuhdetta paremmaksi, jolloin niiden käyttö tulee halvemmaksi kun energiaa ei käytön aikana kulu hukkaan. Tämän työn tarkoitus oli tutkia, että miten hitaasti pyörivän sähkökoneen hyötysuhdetta voidaan parantaa. Testikoneina on käytetty kahta 32-napaista murtovakokäämittyä ja kestopagnetoitua prototyyppiä. Prototyypin A on ABB rakentanut aikaisemmin ja sille on tässä työssä tutkittu hyötysuhteen kannalta parempia rakennevaihtoehtoja ja kehitysideoituja. Kun ratkaisu löytyi, rakennettiin siitä uusi prototyyppikone (prototyyppi B) ja sitä verrattiin koeajoissa prototyyppiin A.

Työssä on aluksi tutkittu sähkökoneen teoriaa ja hyötysuhteeseen vaikuttavia ilmiöitä. Prototyyppi B on pyritty suunnittelemaan niin, että jokaisen hyötysuhtetta alentavan ilmiön vaikutus on minimoitu, jolloin hyötysuhde on tälle konetyypille paras mahdollinen. Sähkökoneen toimintaa on simuloitu etukäteen käyttäen apuna Adept-ohjelmistoa, jolla voidaan tutkia sähkökoneen käyttäytymistä eri toimintapisteissä. Näin hitaasti pyörivässä koneessa suurin häviölähde on staattorikäämin resistiiviset häviöt. Niitä yritettiin pienentää muuttamalla käämityksen kytkentätapaa, suunnittelemalla käämityksiä eri ura- ja napaluvuille sekä täysin väärälle napaluvulle (esimerkiksi staattoriin 36-napainen käämitys kun roottorissa on 32 napaa) ja vaihtamalla sähköteräslevyn koostumusta. Näiden vaikutus oli kuitenkin minimaalinen, sillä suurin parannus saatiin aikaan suurentamalla staattorin uraa, jolloin sinne mahtuu enemmän kuparia. Tällöin saman magneettivuon aikaansaamiseksi tarvitaan pienempi virta, jolloin kuparihäviöt pienenevät, koska kuparihäviöt kasvavat verrannollisena virran neliöön.

Molemmat prototyypit suunniteltiin generaattorina, mutta ne koeajettiin moottorina. Molemmat prototyypit koeajettiin käyttäen samaa 32-napaista kestopagnetoitua roottoria, jolloin saatiin paras mahdollinen vertailu. Molemmat koneet testattiin nimellistoimintapisteessä (20 kW, 65 rpm, 17,3 Hz), alikuormalla (18 kW, 65 rpm, 17,3 Hz) ja ylikuormalla (22 kW, 65 rpm, 17,3 Hz). Prototyyppi B testattiin myös vielä suuremmalla ylikuormalla (25 kW, 65 rpm, 17,3 Hz), koska sen käämin päiden lämpötila oli nimellispisteessä 48 °C alhaisempi kuin prototyyppillä A. Prototyyppi B toimi nimellispisteessä noin 12 % paremmalla hyötysuhteella kuin prototyyppi A. Molempien prototyyppien käämitys tuotti myös aliharmonisia aaltoja, joita ei kokovakokäämityllä koneella esiinny ollenkaan.

LÄHTEET

ABB Oy. 2001. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. [WWW]. [Viitattu 2.3.2011]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf).

ABB Oy. 2009. Pakollinen EuP-direktiivi pienjännitemoottoreille Euroopassa. [WWW]. [Viitattu 23.02.2011]. Saatavissa: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK104295D5466&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>.

Adler, J., Groke, H., Orlik, B., Siatkowski, M. & Schüttler, J. Power-optimized symmetrizing current control with a 8.7 kNm-Transverse Flux Generator. [WWW]. [Viitattu 7.3.2011]. Saatavissa: <http://www.wingypro.com/dissemination/Publication%20at%20OPTIM%202010-%20Romania.pdf>.

Auinger, H., Kracke, G. & Neuhaus, W.. 1980. Improving the Efficiency of Electrical Machines – Possibilities and Limits. Nürnberg, Siemens AG. pp. 285-290.

Aura, L. & Tonteri, A.J. 1994. Teoreettinen sähkötekniikka. Vantaa. Werner Söderström Osakeyhtiö. 448 s.

Blissenbach, R., Popan, A.D. & Viorel, I.A. 2002. A passive Rotor Transverse Flux Motor. [WWW]. [Viitattu 7.3.2011]. Saatavissa: http://szabol0.tripod.com/WorkshopVRM/Workshop_VRM_6.pdf.

Buschart, R.J. 1979. Motor Efficiency. Monsanto Company, St. Louis, Corporate Engineering Division. Volume 1A-15, No 5. pp. 507-510.

Emadi, A. 2005. Energy-Efficient Electric Motors. [WWW]. [Viitattu 23.2.2011]. Saatavissa: <http://www.scribd.com/doc/28009059/Energy-Efficient-Electric-Motors-00>.

Gieras, J.F. & Wing, M. 1997. Permanent Magnet Motor Technology – Design and Applications. New York, Basel, Hong Kong. Marcel Dekker, Inc. 444 p.

Heikkilä, T. 2002. Permanent Magnet Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications – Analysis and Design. Dissertation. Lappeenranta. Lappeenranta University of Technology. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 134. 116 p.

IEC-60034-1. 2004. Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance. Switzerland. International Electrotechnical Commission. 76 p.

Integrated Publishing, Inc. Electrical Engineering Training Series. [WWW]. [Viitattu 1.3.2011]. Saatavissa: www.tpub.com/neets/book5/15f.htm.

Jussila, H. 2005. Napakäämityn murtovakokestomagneettitahtikoneen suunnittelu. Diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. 63 s.

Kortelainen, A. 2010. Sähkömoottoreiden uudet hyötysuhdeluokitukset ja tulevat rajoitukset. [WWW]. [Viitattu 23.2.2011]. Saatavissa: http://www.lut.fi/fi/pumpingday/program/Documents/03_Kortelainen_Antti.pdf.

Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. Yliaalto-opus. [WWW]. [Viitattu 2.3.2011]. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>.

Krishnan, R. 2010. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. Taylor and Francis Group, LLC. 131 p.

Kshirsagar, P. 2010. Magnetic Materials by Powder Metallurgical Route. [WWW]. [Viitattu 25.2.2011]. Saatavissa: <http://pranks08.wordpress.com>.

Nousiainen, K. & Repo, S. 2007. Tahtigeneraattorit. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 102 s.

Parviainen, A. 2000. Pyörivän magneettivuon aiheuttamien tehohäviöiden mittaussähköteräslevystä. Diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 113 s.

Piuhola, A. 2003. Kestomagneettitahtimoottorin häviöiden ja lämpenemän määrittäminen. Diplomityö. Oulu. Oulun yliopisto, sähkötekniikan osasto. 85 s.

Puranen, J. 2006. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study. Dissertation. Lappeenranta. Lappeenranta University of Technology. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 249. 150 s.

Pyrhönen, J. 1995. Pyörivän sähkökoneen suunnitteleminen. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 279 s.

Perho, J. 2006. Winding design. Lecture series 18. Espoo. Helsinki University of Technology. 50 p.

Qian, K. 2005. Betriebsverhalten und Optimierung von perm. err. Linearmotoren in Zahnspulentechnik. Dissertation. Kaiserslautern. Die Technische Universität Kaiserslautern. Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik. 114 s.

Rilla, M. 2006. Kestomagneettitahtikoneen lämpömallinnus. Diplomityö. Lappeenranta. Lappeenranta teknillinen yliopisto. 85 s.

Salminen, P. 2004. Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors for low speed Applications. Dissertation. Lappeenranta. Lappeenranta University of Technology. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 198. 150 s.

Sankaran, C. 1999. Effects of harmonics on power systems. [WWW]. [Viitattu 2.3.2011]. Saatavissa: http://ecmweb.com/mag/electric_effects_harmonics_power_2/#.

Sähkömoottoreiden EFF-hyötysuhdeluokat historiaan! 2010. Esselloo Exprês 2. s. 11.

Tuusa, H., Nurmi, T. & Viitanen, T. 2004. Sähkömoottorit. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 162 s.

Viorel, A.C. Study on Transverse Flux Machine operating as Generator in Wind Mills. [WWW]. Din Cluj-Napoca. Universitatea Tehnica. Faculty of electrical Engineering. [Viitattu 7.3.2011]. Saatavissa: http://www.utcluj.ro/download/doctorat/Rezumat_Alina_Viorel.pdf.

LIITE 1: 2-TASOMURTOVAKOKÄÄMITYKSEN
KÄÄMITYSKERTOIMET ILMAN URAKERROINTA

Taulukko. 2-tasomurtovakäämityksen käänimityskertoimet ilman urakerrointa. Pystyakselilla on napaluku ja vaaka-akselilla uraluku. Tahitikonelle epäsojivat napa- ja uraluvun yhdistelmät on merkitty punaisella.

Käämityskertoimet ilman urakerrointa																				
2p/Q	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
2	0,866																			
4	0,866	0,866																		
6			0,865																	
8		0,866	0,945	0,866																
10			0,945	0,933	0,866															
12				0,865		0,616	0,866													
14				0,933	0,951	0,793	0,577													
16				0,866	0,951	0,945	0,182	0,866												
18					0,616		0,626	0,604	0,866											
20					0,866	0,945	0,953	0,933	0,129	0,866										
22						0,793	0,953	0,949	0,186	0,389	0,866									
24						0,866	0,626		0,545	0,616	0,199	0,866								
26							0,182	0,949	0,554	0,815	0,131	0,179	0,866							
28							0,866	0,933	0,554	0,951	0,187	0,793	0,081	0,866						
30								0,604	0,545		0,632	0,933	0,203	0,000	0,866					
32								0,866	0,186	0,951	0,954	0,945	0,133	0,182	0,068	0,866				
34									0,129	0,815	0,954	0,986	0,188	0,401	0,083	0,127	0,866			
36									0,866	0,616	0,632		0,634	0,626	0,616	0,604	0,118	0,866		
38										0,389	0,187	0,953	0,954	0,821	0,134	0,184	0,065	0,192	0,866	
40										0,866	0,131	0,945	0,954	0,953	0,945	0,933	0,083	0,129	0,052	0,866
42											0,199	0,933	0,634		0,951	0,628	0,207	0,793	0,120	0,196
44											0,079	0,793	0,188	0,953	0,955	0,949	0,134	0,186	0,070	0,389
46											0,179	0,133	0,821	0,955	0,954	0,954	0,190	0,406	0,084	0,130

LIITE 2: ADEPT-LASKELMA PROTOTYYPILLE A GENERAATTORINA

M3BJ 315LKC 32		Base program: Fcsmek-sydc				15.03.2011 - 10:34:12				
COMMENTS:										
M3BJ315LK 32 MO-20614/1 GENER. 65 RPM 20 KW PINTAMAGN. 2008-12-18 A.HAURU. ST.URITUS M088										
winding.data:										
36 32 9 +1 -1 -2 +2 -2 -3 +3 -3 -1 +1 -1 +1 +2 -2 +2 +3 -3										
+3										
KIEKKO										
DO1	520.000	DELTA	1.300	KUORMA	KENTTA	avg	/	max	/	RMS
DI1	380.000	DI2	100.000	UN	400.000	Bst	0.872	1.439	1.018	
L_TOT1	600.000	LM1	700.000	CONNECT1	1	Bry	0.154	1.736		
L_TOT2	600.000	LM1_add	58.897	Ia	34.770	Bst_tips	2.318			
LP	600.000	C	54.389	Ikaami	34.770	Bag	0.632	1.143	0.808	
				COS100	0.830					
2P	32.000	SKSLOT1	0.000	FN,SPAR(7)	17.33	Treq		0.000		
Q1	36	SKSLOT2	0.000	SPEED100	64.987	Tlos		-3700.980		
				DLT	-47.214	Tfem		-3922.695		
ST.URA										
tins	0.500	N_MAGNET	1.000	Z1	308					
BSY1	3.400	H_MAGNET	7.300	ZTHCK+ZTHN	7	ZN1		44.000		
BSI1	16.000	L_MAGNET	600.000	ZTHIN1	6	DTHIN1		1.180		
BSO1	23.000	POS_MAGNE	0.000	ZTHICK1	1	DTHICK1		1.250		
HSY1	2.000			A1	1	Ja		4.464		
HSADD1	2.000			NLAYER1	2	q		0.375		
HSN1	35.000			YPITCH1	1	nco		22.000		
HSB1	3.000			KCU1	0.576	n1		264.000		
HSTOT1	42.000			KFW1	0.575					
BM										
1	28.00	2	0.00	3	0.00	4	0.00	5	0.00	6
HGAP	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BGAP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KUORMA										
UN	400.000	Treq	2938.810	SIJ.KYTK	MASSAT					
FN,Adept	17.330	Pmax	30.249	Lad [mH]	50.58	m_stt		124.428		
Ef	416.136	Dmax	-87.684	Laq [mH]	48.53	m_stc		195.110		
U0	416.311	Tmax/T	1.201	LEW1 [mH]	0.1971	m_st		319.538		
		Pred	4.625	Xad [mOhm]	5486.	m_rti		429.556		
(Pfe,max	0.685)	TRUN1 [K]	80	Xaq [mOhm]	5263.	m_pm		29.826		
Pfe,CIMAC	0.567	TRUN2 [K]	80	X1 [mOhm]	21.46	m_cu		76.948		
Pmec	0.316	AMB_TEMP [C]	40			m_cu1		12.124		
Pcu	4.203	KTOOTH1	1.78	Ia	34.770	m_cu2		64.824		
Padd	0.100	KYOKE1	1.33	Iphi [deg]	193.338	KFE1		0.970		
Ptot	5.187	KPFE1	2.390	Iad	-8.021	KFE2		0.970		
		addi	0.005	Iaq	-33.832	rho_st		7750.000		
Pout	20.000	COS100	0.830			rho_rt		7750.000		
Pin	25.187	SPEED100	64.987	R1PH120	1158.990	rho_pm		7600.000		
eff	79.406			R1PH20	832.514	rt/st:		M600-50A		
						pm:		NdFeB,No.2		
ICMODE = IC416 (Adept code 13) MAX Pshaft/Pn 1.113 MAX dlt -76.000										
Pout/Pnom	Pout	cosf	Pin	eff	I	Ploss	dlt			
-1.250	-25.000	0.979	-30.724	81.370	36.875	5.724	50.680			
-1.000	-20.000	0.996	-23.875	83.770	28.989	3.875	39.170			
-0.750	-15.000	1.000	-17.553	85.456	21.655	2.553	28.897			
0.750	15.000	0.910	17.899	83.804	23.794	2.899	-31.686			
1.000	20.000	0.830	25.187	79.406	34.770	5.187	-47.214			
1.250	22.800	0.543	36.768	62.010	60.628	13.968	-90.000			

LIITE 3: ADEPT-LASKELMA PROTOTYYPILLE B GENERAATTORINA

M3BJ 315LKC 32G

Base program: Fcsmek-sydc

24.03.2011 - 10:59:16

COMMENTS:

M3BJ315LK 32 POHJANA MO-20614/1, ALKUP. LASKELMA LKH86933, VANHA ROOTTORI JA UUSI STAATTORI, GENER. 65 RPM 20 KW PINTAMAGN. 2011-02-28 E.VIERTOKOSKI. ST.URITUS M088 winding.data:

36 32 9 +1 -1 -2 +2 -2 -3 +3 -3 -1 +1 -1 +1 +2 -2 +2 +3 -3

+3

KIEKKO

DO1

DI1

L_TOT1

L_TOT2

LP

520.000 DELTA

380.000 DI2

600.000 LM1

600.000 LM1_add

600.000 C

1.300

100.000 UN

700.000 CONNECT1

58.374 Ia

50.197 Ikaami

KUORMA

Preq

UN

CONNECT1

Ia

Ikaami

20.000 Bst

400.000 Bsy

1 Bry

35.681 Bst_tips

35.681 Bag

KENTTA

avg / max / RMS

0.966 1.547 1.094

0.494 1.544 1.092

0.155 1.729

2.324

0.631 1.016 0.718

2P

Q1

32.000 SKSLOT1

36 SKSLOT2

0.000

0.000

FN, SPAR(7)

SPEED100

DLT

17.33 Treq

64.987 Tlos

-40.675 Tfem

0.000

-3415.777

-3559.137

ST.URA

tins

BSY1

BSI1

BSO1

HSY1

HSADD1

HSN1

HSB1

HSTOT1

7 RT.URA

0.500 N_MAGNET

4.000 H_MAGNET

18.000 L_MAGNET

26.000 POS_MAGNE

2.000

2.000

45.000

5.000

54.000

1 KAAMI

1.000 Z1

7.300 ZTHCK+ZTHN

600.000 ZTHIN1

0.000 ZTHICK1

A1

NLAYER1

YPITCH1

KCU1

KFW1

400

10 ZN1

5 DTHIN1

5 DTHICK1

1 Ja

2 q

1 nco

0.576 n1

0.575

40.000

1.250

1.320

2.749

0.375

20.000

240.000

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

BM

HGAP

BGAP

28.00

0.10

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

0.00

KUORMA

UN

FN,Adept

Ef

UO

400.000 Treq

17.330 Pmax

364.547 Dmax

373.062 Tmax/T

2938.810

33.073

-88.140

1.423

2.761

SIJ.KYTK

Lad [mH]

Ia [mH]

LEW1 [mH]

Xad [mOhm]

Xaq [mOhm]

40.51

39.35

0.1629

4394.

4267.

MASSAT

m_stt

m_stc

m_st

m_rti

m_pm

144.965

115.539

260.503

429.556

29.826

(Pfe,max

Pfe,CIMAC

Pmec

Pcu

Padd

Ptot

0.655) TRUN1 [K]

0.416 TRUN2 [K]

0.315 AMB_TEMP [C]

2.415 KTOOTH1

0.100 KYOKE1

3.246 KPFE1

80

80

40

1.78

1.33

2.390

X1 [mOhm]

Iphi [deg]

Iad

Iaq

17.73

184.678

-2.910

-35.562

KFE1

KFE2

rho_st

rho_rt

rho_pm

rt/st:

116.562

61.453

55.108

0.970

0.970

7750.000

Pout

Pin

eff

20.000 COS100

23.246 SPEED100

86.036

0.809

64.987

COS100

R1PH120

R1PH20

7600.000

632.316

454.199

pm:

NdFeB,No.2

ICMODE = IC416 (Adept code 13)

MAX Pshaft/Pn 1.383

MAX dlt -80.000

Pout/Pnom

Pout

cosf

Pin

eff

I

Ploss

dlt

-1.250

-25.000

0.934

-28.679

87.171

38.633

3.679

44.392

-1.000

-20.000

0.952

-22.546

88.708

30.312

2.546

34.247

-0.750

-15.000

0.960

-16.735

89.633

22.543

1.735

25.007

0.750

15.000

0.839

17.045

88.002

25.792

2.045

-28.835

1.000

20.000

0.809

23.246

86.036

35.681

3.246

-40.675

1.250

25.000

0.741

30.417

82.192

48.702

5.417

-57.047

LIITE 4: MATLAB-KOODI JÄNNITTEEN JA VIRRAN HARMONISTEN KOMPONENTTIENTEN LASKENTAAN

```
% HARMONISTEN LASKENTA- ja PIIRTOTIEDOSTO

% 1. INDUSOITUNUT JÄNNITE

% lkm sisältää 16 aaltoa näytteistä
lkm = 229840;

% Luetaan tiedostoon vaihejännitteet U1 ja U2
Data1 = dlmread('U1v.txt','',[1 1 lkm 1]);
Data2 = dlmread('U2v.txt','',[1 1 lkm 1]);

% Muodostetaan vaihejännitteistä pääjännite
Data3 = Data1 - Data2;

% Muodostetaan huippuarvosta tehollisarvo
Data3_rms = Data3 / sqrt(2);

% Fourier-muunnos
Y = fft(Data3_rms,lkm) / lkm*2;

% Piirretään kuvaaja
bar(0:99,abs(Y(1:100))),grid;

% Nimetään kuvan akselit
xlabel('Harmonisen järjestysluku'), ylabel('Jännite (V)');

% Rajataan akselit
axis([0 50 0 520]);

% Tulostetaan valmis kuva tiedostoon
print -djpeg -r300 Indusoitunut_jännite

% 2. KUORMAVIRTA

% lkm sisältää 16 aaltoa näytteistä
lkm = 229840;

% Luetaan tiedostoon kuormavirta
Data4 = dlmread('I1.txt','',[1 1 lkm 1]);

% Huippuarvosta muodostetaan tehollisarvo
Data4_rms = Data4 / sqrt(2);

% Fourier-muunnos
Y = fft(Data4_rms,lkm) / lkm*2;

% Piirretään kuvaaja
bar(0:99,abs(Y(1:100))),grid;

% Nimetään kuvan akselit
xlabel('Harmonisen järjestysluku'), ylabel('Kuormavirta (A)');

% Rajataan akselit
axis([0 50 0 40]);

% Tulostetaan valmis kuva tiedostoon
print -djpeg -r300 Kuormavirta
```